

MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE UN MOLDE PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO
POR COQUILLA

PABLO CARRIZOSA ISAZA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE PLÁSTICOS
MEDELLÍN
2007

MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE UN MOLDE PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO
POR COQUILLA

PABLO CARRIZOSA ISAZA

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Asesor:

Gabriel Jaime Páramo

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE PLÁSTICOS
MEDELLÍN
2007

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION	11
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. OBJETIVOS	13
4. METODOLOGIA	14
5. LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN	15
5.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN	15
5.1.1. FUNDICIÓN EN ARENA	16
5.1.2. FUNDICIÓN POR COQUILLA O MOLDE PERMANENTE	17
5.1.3. FUNDICIÓN POR INYECCIÓN	20
5.1.4. FUNDICIÓN CENTRÍFUGA	21
6. EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO POR COQUILLA	23
6.1. EL HORNO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO	24
6.2. LA MAQUINA BASCULANTE	25
6.3. EL MOLDE DE FUNDICIÓN	26
6.4. ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN	28
7. CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO DEL MOLDE DE FUNDICION DE ALUMINIO POR COQUILLA	31
7.1. UTILIZACION DE PIEZAS ESTANDAR	31
7.2. MATERIALES EN LA FABRICACIÓN DEL MOLDE	32
7.3. CANALES DE ALIMENTACIÓN	34
7.3.1. ELEMENTOS EN UN SISTEMA DE CANALES DE ALIMENTACIÓN	34
7.3.2. FUNCION DE LAS PUERTAS (GATES)	36
7.4. EVACUACIÓN DE GASES	36
7.5. CONTRACCIONES	37

8. PROPUESTA DE DISEÑO PARA EL ARTÍCULO A FABRICAR CON EL MOLDE.	39
9. DESARROLLO DEL MOLDE PARA FUNDICION DE ALUMINIO POR COQUILLA.	41
9.1. CAVIDADES DEL MOLDE	42
9.1.1. MACHO DEL MOLDE	43
9.1.2. HEMBRA DEL MOLDE	44
9.2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	45
9.3. SISTEMA DE EVACUACION DE GASES	50
9.4. SISTEMA DE EXPULSION Y RECUPERACIÓN	51
9.5. MECANISMO DE CORREDERA	52
9.6. SUJECION A LA MAQUINA BASCULANTE	54
9.7. ENSAMBLE DEL MOLDE	54
10. ANALISIS DE LLENADO DEL MOLDE	63
10.1.FUNDAMENTACION TEORICA PARA EL ANALISIS DEL MOLDE	64
10.1.1. PARAMETRIZACION DEL ANALISIS	64
10.1.2. GENERACION Y MALLADO DEL MODELO DE ESTUDIO	75
10.1.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION	78
10.2. RESULTADOS DE LA SIMULACION	80
10.2.1. ANALISIS DE RESULTADOS PARA LA PROPUESTA ORIGINAL DE CANALES DE ALIMENTACION	80
10.2.2. ANALISIS DE RESULTADOS PARA LA PROPUESTA ALTERNATIVA DE CANALES DE ALIMENTACION	90
10.3.CAUSAS DE ERROR EN EL ANALISIS	99
11. CONCLUSIONES	101
12. RECOMENDACIONES	103
13. BIBLIOGRAFIA	104
13.1.CLASICA	104
13.2.INTERNET	105

TABLA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Fundición en arena.	16
Ilustración 2. Molde para llenado gravimétrico de aleaciones Al-Mg	17
Ilustración 3. Maquina basculante para fundición por coquilla	18
Ilustración 4. Maquina multi-estación para fundición por gravedad	19
Ilustración 5. Esquema de inyección con cámara fría	20
Ilustración 6. Esquema de inyección con cámara caliente	20
Ilustración 7. Esquema de fundición centrifuga.	21
Ilustración 8. Horno de fundición por medio de quemadores.	24
Ilustración 9. Secuencia de movimiento de la maquina basculante.	25
Ilustración 10. Molde para fundición de aluminio por coquilla.	27
Ilustración 11. Llenado del molde permanente.	27
Ilustración 12. Coincidencia entre la hembra y el macho del molde.	33
Ilustración 13. Frentes de flujo interactuando con el molde.	34
Ilustración 14. Esquema de contracción en tres regímenes.	37
Ilustración 18. Render del sartén ovalado en isométrico.	39
Ilustración 19. Render del sartén ovalado de perfil.	39
Ilustración 20. Render del sartén ovalado vista inferior.	39
Ilustración 21. Corte en sección del molde con el nombre de las piezas.	40
Ilustración 22. Análisis del ángulo de salida en la pieza.	41
Ilustración 23. Corte en sección del macho del molde.	42
Ilustración 24. Vista del macho en isométrico.	43
Ilustración 25. Vista en isométrico de la hembra del molde.	43
Ilustración 26. Vista superior de la hembra del molde.	44
Ilustración 27. Coquilla en el lado hembra del molde.	45

Ilustración 28. Vista frontal y corte lateral de la boca de entrada de material.	45
Ilustración 29. Diferentes alturas en el canal de alimentación del molde.	46
Ilustración 30. Vista en sección del canal de alimentación con consideraciones para el desmolde.	47
Ilustración 31. Zona de llenado final de la pieza.	47
Ilustración 32. Corte en vista lateral de los canales de alimentación.	48
Ilustración 33. Corte en vista superior de los canales de alimentación.	48
Ilustración 34. Sistema de respiraderos del molde.	49
Ilustración 35. Esquema de la expulsión de la pieza.	50
Ilustración 36. Inserto lateral del molde.	51
Ilustración 37. Sistema de corredera con molde cerrado.	52
Ilustración 38. Sistema de corredera con molde abierto.	52
Ilustración 39. Placas de soporte lado macho y hembra.	53
Ilustración 40. Componentes lado macho del molde.	54
Ilustración 41. Vista frontal lado macho del molde.	55
Ilustración 42. Isométrico lado macho del molde.	55
Ilustración 43. Componentes lado hembra del molde.	56
Ilustración 44. Vista frontal lado hembra del molde.	57
Ilustración 45. Isométrico del lado hembra del molde.	57
Ilustración 46. Piezas estándar en el lado macho del molde.	58
Ilustración 47. Piezas estándar en el lado hembra del molde.	59
Ilustración 48. Vista de perfil del molde con transparencias en el lado hembra.	60
Ilustración 49. Vista inferior del molde con transparencias en el lado hembra y placa porta macho.	60
Ilustración 50. Isométrico del molde con transparencias en el lado hembra.	61
Ilustración 51. Pieza para análisis original.	62
Ilustración 52. Pieza para análisis alternativa.	63
Ilustración 53. Información del aluminio para el llenado.	64
Ilustración 54. Información del material del molde.	66

Ilustración 55. Grafico de porcentaje solido Vs temperatura y cambio volumétrico.	67
Ilustración 56. Fracción solida Vs viscosidad del aluminio.	68
Ilustración 57. Grafico de Densidad Vs temperatura del aluminio.	69
Ilustración 58. Movimiento laminar de un fluido por un canal solido.	70
Ilustración 59. Viscosidad Vs temperatura, modelo newtoniano.	71
Ilustración 60. Dependencia de la conductividad térmica respecto a la temperatura de sólidos seleccionados.	72
Ilustración 61. Conductividad térmica Vs viscosidad del aluminio.	73
Ilustración 62. Conductividad térmica Vs temperatura del acero O1.	73
Ilustración 63. Información de coeficientes de transferencia de calor.	74
Ilustración 64. Proceso de generación de la malla de la cavidad.	76
Ilustración 65. Proceso de mallado del molde.	76
Ilustración 66. Ecuación de Navier-Stokes para fluidos incompresibles.	79
Ilustración 67. Distribución de presiones al interior del molde y líneas de comportamiento de las partículas en el llenado.	80
Ilustración 68. Progresión de velocidades durante el llenado.	81
Ilustración 69. Corte en sección del canal mostrando velocidades.	82
Ilustración 70. Temperaturas en la pieza justo al terminar la solidificación.	83
Ilustración 71. Secuencia de llenado con comportamiento de la temperatura.	84
Ilustración 72. Imagen que indica la solidificación progresiva del aluminio.	85
Ilustración 73. Tiempo de solidificación de la pieza.	86
Ilustración 74. Distribución de las propiedades del material.	87
Ilustración 75. Densidades del aluminio al finalizar la solidificación.	88
Ilustración 76. Corte central del molde en xy, xz y yz.	89
Ilustración 77. Velocidades al terminar el llenado del molde y líneas de comportamiento del flujo.	90
Ilustración 78. Representación grafica de las presiones en el diseño alternativo.	91
Ilustración 79. Progresión de velocidades en el flujo de llenado.	92
Ilustración 80. Secuencia de llenado con comportamiento de las temperaturas.	93

Ilustración 81. Temperaturas al finalizar la solidificación.	94
Ilustración 82. Representación de la solidificación progresiva del aluminio.	95
Ilustración 83. Tiempo de solidificación de la alternativa de diseño de canales.	95
Ilustración 84. Distribución de las propiedades del material para el diseño alternativo.	96
Ilustración 85. Densidades del aluminio al finalizar la solidificación.	97
Ilustración 86. Corte central del molde en xy, xz y yz con comportamiento de la temperatura.	98

TABLA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de la aleación de aluminio A 380.	28
Tabla 2. Propiedades del acero AISI O1.	31
Tabla 3. Propiedades del hierro gris.	32
Tabla 4. Contracciones de solidificación para algunos metales.	37

1. INTRODUCCION

Los procesos de fundición permiten dar forma a un sinnúmero de objetos que se han convertido en parte fundamental de las necesidades del ser humano, al dar forma a los metales para hacer que estos faciliten el diario vivir de las personas.

Mostrar cómo se hace el desarrollo de un molde permite ilustrar el trabajo que se requiere para llevar una necesidad a una idea de producto, y esa idea a un proceso de manufactura, para finalmente obtener un artículo que encierra todo el avance del desarrollo en la técnica y el diseño.

En este documento se muestra cómo se hace el desarrollo un molde de fundición para aluminio por coquilla¹ de un sartén, pero no sin antes mostrar las generalidades del proceso y las consideraciones que se debe tener para lograr conseguir con éxito un buen diseño del molde. Posteriormente y a manera de retroalimentación se hace con ayuda de un programa especializado en procesos de fundición el análisis de llenado de la cavidad del molde, para poder descubrir cómo se comportará éste desde antes de ser fabricado y con esto poder tomar las medidas correctivas del caso.

¹ Coquilla: En un molde permanente, es el recipiente que recibe el material fundido.

2. JUSTIFICACION

El proceso de fundición por coquilla es entre los procesos de fundición de metales no ferrosos uno de los más tecnificados, especialmente por la maquinaria que permite realizar los diferentes movimientos y ciclos del moldeo, pero en igual proporción sigue siendo un proceso bastante artesanal, dado que depende en más de un 50% de la pericia del operario, que el producto final quede bien elaborado y de aceptable calidad.

Se debe resaltar la importancia de que tener un buen molde permite mayores volúmenes de producción, al igual que se puede exigir al mismo un mayor número de ciclos. Por tanto es importante aplicar los conocimientos actuales y los adelantos tecnológicos en diseño, análisis de ingeniería y manufactura, al igual que un buen criterio de selección de materiales para el desarrollo de moldes más duraderos que permitan mayor productividad, con un mínimo de mantenimiento.

Con este proyecto se pretende mostrar cómo se desarrolla un molde de fundición para aluminio por coquilla, ya que la información sobre este proceso es bastante limitada y de difícil consecución en el medio colombiano y los diseños de los moldes que normalmente se consiguen son bastante insuficientes en la aplicación de la técnica, de igual forma se desea mostrar un análisis del llenado del molde con aluminio, ya que en la industria colombiana los procesos de fundición en su mayoría son prácticamente artesanales y el diseño del llenado se hace con base en la experiencia y muy poco en los análisis que la tecnología permite realizar para mejorar la calidad de los productos, aumentar niveles de producción y disminuir costos.

3. OBJETIVOS

GENERAL

Analizar el comportamiento de un molde en el proceso de fundición de aluminio por coquilla (molde permanente para fundición por gravedad).

ESPECÍFICOS

- Presentar las generalidades acerca del proceso de fundición de aluminio por coquilla.
- Identificar la información requerida para desarrollar la modelación de un molde para fundición de aluminio por coquilla.
- Realizar la modelación y los planos de un molde para fundición de aluminio por coquilla.
- Aplicar un análisis al modelo del molde utilizando un software especializado para procesos de fundición.
- Desarrollar con base en los resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones para mejorar el desempeño del molde.

4. METODOLOGIA

En este proyecto se va de lo general a lo particular. Primero se comienza explicando las generalidades sobre la fundición y enumerando algunos de los procesos más utilizados dentro de ésta, como la fundición en arena, por coquilla o inyección. Se pasa luego a una explicación más detallada del proceso de fundición de aluminio por coquilla, que es con el cual se opera el molde propuesto en el proyecto, los equipos que lo componen, su funcionamiento y las propiedades de la aleación de aluminio utilizada para éste proceso.

Posteriormente se definen las consideraciones que se debe tener en cuenta para el desarrollo de un molde para fundición de aluminio por coquilla, la función de cada uno de sus componentes y sistemas, y la distribución que estos tienen dentro del molde.

Luego de explicar el proceso y las consideraciones para el desarrollo del molde, se procede a mostrar las propuestas de diseño para el artículo a fabricar con el molde, y luego de seleccionar una, se hace la descripción del molde desarrollado para este proyecto, describiendo cada uno de sus componentes y sistemas, justificando su finalidad y mostrando cómo se interrelacionan.

Al extraer de la modelación del molde la pieza que se llena con el aluminio, se realiza el análisis de llenado mediante un software especializado en procesos de fundición. Con este software se puede predecir el comportamiento del aluminio dentro de la cavidad y se puede identificar posibles defectos e ineficiencias.

Finalmente se concluye sobre el desarrollo hecho y se hace las respectivas recomendaciones para mejorar el desempeño del molde.

5. LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

La fundición es utilizada dentro del mundo de los metales para dar forma a infinidad de artículos que son de fundamental importancia para la vida diaria, desde objetos de uso domestico, hasta piezas que se utilizan en la industria aeroespacial, siendo su uso más común el de partes que intervienen en los procesos de producción de casi todos los tipos de industria.

Aunque este proyecto trata específicamente el proceso de fundición de aluminio por coquilla para fabricar productos de cocina, es importante conocer algunos de los otros métodos de fundición existentes, dado que dependiendo de la pieza o la línea de artículos que se desee desarrollar, es que se decide el proceso de fundición a utilizar, ya sea por la geometría o propiedades mecánicas que deba tener, e igualmente por el costo y la inversión que se debe hacer a la hora de escoger un proceso.

5.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

Los procesos de fundición se clasifican en tres grupos principales dependiendo del tipo de molde:

- Con modelo permanente y molde destructible: En este grupo se encuentra principalmente la fundición en arena con modelo permanente, en la que el modelo para dar forma a la cavidad es reutilizable, mientras que el molde luego de cumplir el ciclo de llenado es destruido para poder extraer la pieza terminada.
- Con modelo y molde destructible: En este grupo tanto el modelo como el molde se utilizan una única vez. Es el caso de la fundición a la cera perdida, donde el

modelo es de cera y el molde de arena, y al verter el metal líquido la cera se evapora. Similar a la cera perdida es el vaporizable, donde el modelo es de poliestireno expandido y el molde de arena.

- Con molde permanente: Se utiliza para producción de grandes volúmenes debido que el molde es reutilizable. Dentro de este grupo se encuentran principalmente la fundición por llenado gravimétrico, por llenado a presión con cámara caliente o fría y la fundición centrífuga.

A continuación se describen algunos de los procesos de fundición más utilizados en la industria.

5.1.1. FUNDICIÓN EN ARENA

En la fundición en arena, los moldes no son permanentes. Para formar el espacio vacío a llenar con el metal, se utiliza un modelo o en ocasiones una terraja², Los moldes pueden prepararse a mano, o con ayuda de una máquina.

En el caso del moldeo en arena verde, el metal se vierte en moldes de arena verde o sin secar. Mientras que si es moldeo en arena estufada, los moldes se secan entre 400-600°C antes de introducirles el metal (GERLING, 1979).

² Terraja: Herramienta utilizada en la fundición en arena para crear partes huecas en la pieza.

Ilustración 1. Fundición en arena.



WIKILIBROS@³, 2006.

5.1.2. FUNDICIÓN POR COQUILLA O MOLDE PERMANENTE

El proceso de fundición de aluminio por coquilla puede ser desarrollado de diferentes formas, ya que no es un proceso estandarizado y en la mayoría de los casos es bastante artesanal aunque no tanto como la fundición en arena.

La forma en que se realiza dicho proceso de fundición puede ir desde un sistema completamente manual, hasta un sistema automatizado.

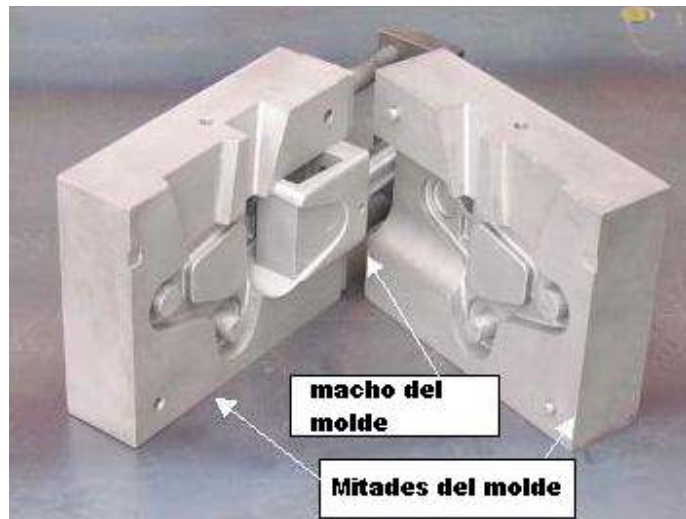
- FUNDICIÓN POR COQUILLA MANUAL

En este sistema, se cuenta exclusivamente con la hembra y el macho del molde, que son cerrados y asegurados manualmente por un operario, de igual forma este operario llena el molde con el metal líquido, para posteriormente abrirlo y extraer la

³ @: Bibliografía tomada de internet.

pieza conformada. En la ilustración 2 se muestra un molde con sistema manual, nótese que solo consta de dos piezas.

Ilustración 2. Molde para llenado gravimétrico de aleaciones Al-Mg



U.S. DEPARTMENT OF ENERGY@, 2004.

- FUNDICIÓN POR COQUILLA SEMIAUTOMÁTICA

Aquí el molde es montado sobre una maquina basculante⁴ (ilustración 3), donde pasa de una posición de recepción del material fundido y llenado, a una posición en la que termina de llenarse y se solidifica la pieza. El mecanismo del molde en este sistema es mucho más complejo que en el sistema manual, ya que la maquina basculante no solo realiza los movimientos ya descritos, sino que también abre y cierra el molde y este a su vez expulsa la pieza al estar solidificada. Este es un sistema semiautomático, debido a que se requiere de un operario que llene el molde y extraiga la pieza conformada.

⁴ Maquina basculante: Se le llama basculante porque rota sobre un eje que le permite realizar movimientos de basculación.

Sobre este sistema se fundamentara el desarrollo del proyecto, por lo que más adelante se describirá detalladamente.

Ilustración 3. Maquina basculante para fundición por coquilla



CARRIZOSA, 2006

- FUNDICIÓN POR COQUILLA AUTOMATIZADA

Se utiliza principalmente en empresas de gran tamaño con altos niveles de tecnificación y altos volúmenes de producción. Aquí, el metal fundido es dosificado en el molde por un sistema automático en una proporción exacta y sin la necesidad de un operario que realice dicha labor. En la ilustración 4 se puede observar una maquina multi-estación automática de fundición, fabricada por la compañía inglesa *Worswick*, que tiene una distribución en forma de carrusel, en el centro se encuentra el horno que funde el metal, y dispuestos en círculo alrededor de éste los moldes que reciben el metal fundido.

Ilustración 4. Maquina multi-estación para fundición por gravedad



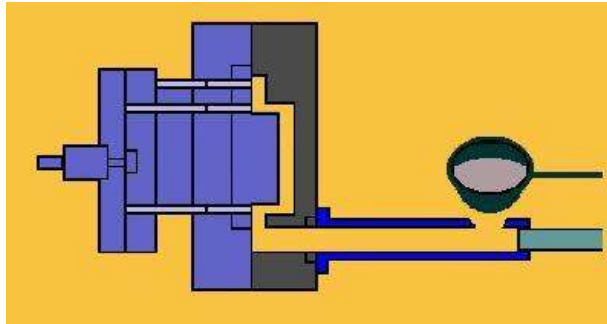
WORSWICK@, 1996

5.1.3. FUNDICIÓN POR INYECCIÓN

Para metales con punto de fusión bajo como el aluminio, latón, bronce, magnesio, zamac, estaño, que son metales no ferrosos, se pueden emplear métodos de fundición que permiten mejores acabados superficiales e incrementar los niveles de productividad (RAMSDEN@, 2006), la mayoría de estos métodos constan de un molde que permite ser reutilizado durante un gran número de ciclos, es el caso de la inyección para metales como el zamac, el aluminio o el magnesio, en el cual el material se introduce a alta presión dentro de un molde metálico logrando un llenado prácticamente perfecto de la cavidad (GERLING, 1979).

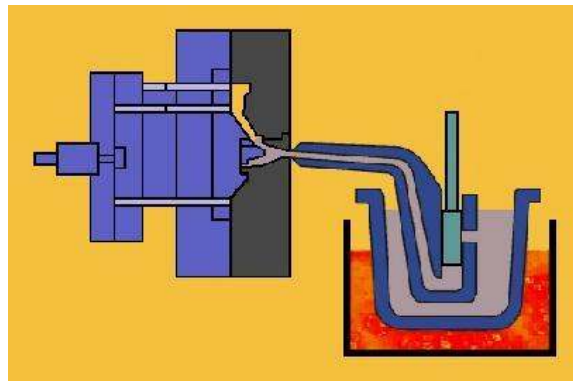
En la inyección con cámara fría (ilustración 5), el metal fundido se vierte en la cavidad cilíndrica, para luego ser empujado por un actuador hidráulico y así llenar la cavidad del molde a presión. Por otra parte en la inyección con cámara caliente (ilustración 6), el cilindro que recibe el material, se encuentra inmerso dentro del contenedor con el metal fundido, por lo que la misma máquina se auto recarga cada vez que realiza el proceso de inyección.

Ilustración 5. Esquema de inyección con cámara fría



NADCA@, 2005

Ilustración 6. Esquema de inyección con cámara caliente

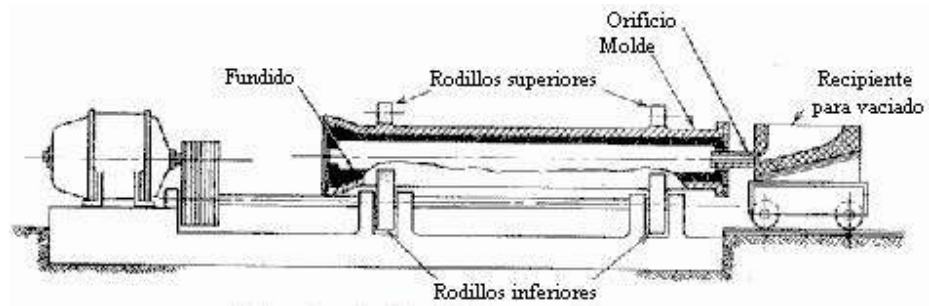


NADCA@, 2005

5.1.4. FUNDICIÓN CENTRÍFUGA

El proceso de colada centrífuga es adecuada para la fabricación de cuerpos de revolución huecos, por ejemplo, tubos, cilindros, casquillos y cojinetes (GERLING, 1979). Se hace girar el molde mientras se solidifica el metal, utilizando así la fuerza centrífuga para acomodar el metal en el molde. Se obtienen mayores detalles sobre la superficie de la pieza y la estructura densa del metal adquiere propiedades físicas superiores. Las piezas de forma simétricas se prestan particularmente para este método, aun cuando se pueden producir otros muchos tipos de piezas fundidas. (INDUSTRIALUSM@)

Ilustración 7. Esquema de fundición centrífuga.



APRENDIZAJE.COM@, 2007

6. EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO POR COQUILLA

Como se mencionó anteriormente, la fundición por coquilla se puede desarrollar con diferentes sistemas y para diferentes materiales, pero para el caso a tratar se utiliza el sistema de moldeo semi-automatizado, ya que es el sistema que utiliza la empresa para la cual se desarrolla el molde en este proyecto.

Se hace una descripción general del proceso para luego ahondar en cada uno de sus elementos por separado:

Se comienza en el horno de fundición, en el que se lleva a estado líquido los lingotes de aluminio con los demás elementos aleantes⁵, principalmente hierro y silicio. El horno cuenta con dos quemadores de aceite de petróleo, que le permiten elevar al aluminio a una temperatura de entre 780 y 820 °C, temperatura a la cual se encuentra completamente líquido, ya que su punto de fusión es de aproximadamente 760 °C.

El aluminio en estado líquido debe ser conducido a los moldes por un operario, al que se le llama moldeador, éste se encarga de recoger el aluminio con una cuchara de acero con vástago largo, y agregar un agente saturador. El agente saturador se utiliza para saturar el hidrógeno presente en el aluminio, y hacer que las burbujas que se forman al solidificarse la pieza sean imperceptibles. También se puede utilizar un desgasificante para eliminar el hidrógeno de la colada.

Es importante anotar que cuando la aleación de aluminio se encuentra en estado líquido, el hidrógeno del aire se solubiliza en esta, siendo el único gas capaz de

⁵ Elementos Aleantes: Son los elementos como el silicio y el hierro que combinados con el aluminio conforman el material de llenado.

solubilizarse en el aluminio. Normalmente a una humedad relativa del 30% y una temperatura del fundido de 750°C, la concentración de hidrogeno disuelto en la colada es de 1 ml/Kg, dándose la condición de que entre más alta sea la temperatura del fundido, mayor será la concentración de hidrogeno en la colada (CAMPBELL, 1991).

Posteriormente, el moldeador⁶ deposita el aluminio en la coquilla, que es un recipiente unido al molde que se encarga de recibir el material fundido que posteriormente será conducido hacia el interior del molde, adicionalmente el moldeador debe accionar un interruptor que hace que la maquina basculante sobre la que se encuentra instalado el molde rote 90° para hacer que éste, que se encuentra en una posición horizontal para recibir el aluminio en la coquilla, pase a una posición vertical en la que se llena la cavidad del molde.

Lugo de haberse llenado la cavidad, y transcurrido un tiempo programado de solidificación, el molde se abre automáticamente, expulsando la pieza para ser finalmente retirada por el moldeador y llevada al post proceso requerido para obtener el producto terminado.

6.1. EL HORNO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO

Para fundir el aluminio a utilizar en la fundición por coquilla, se debe utilizar un horno que tenga la capacidad de mantener la colada⁷ a una temperatura de entre 780°C y 820°C, para que esta se encuentre en una fase completamente liquida y pueda ser transportada e introducida en el molde.

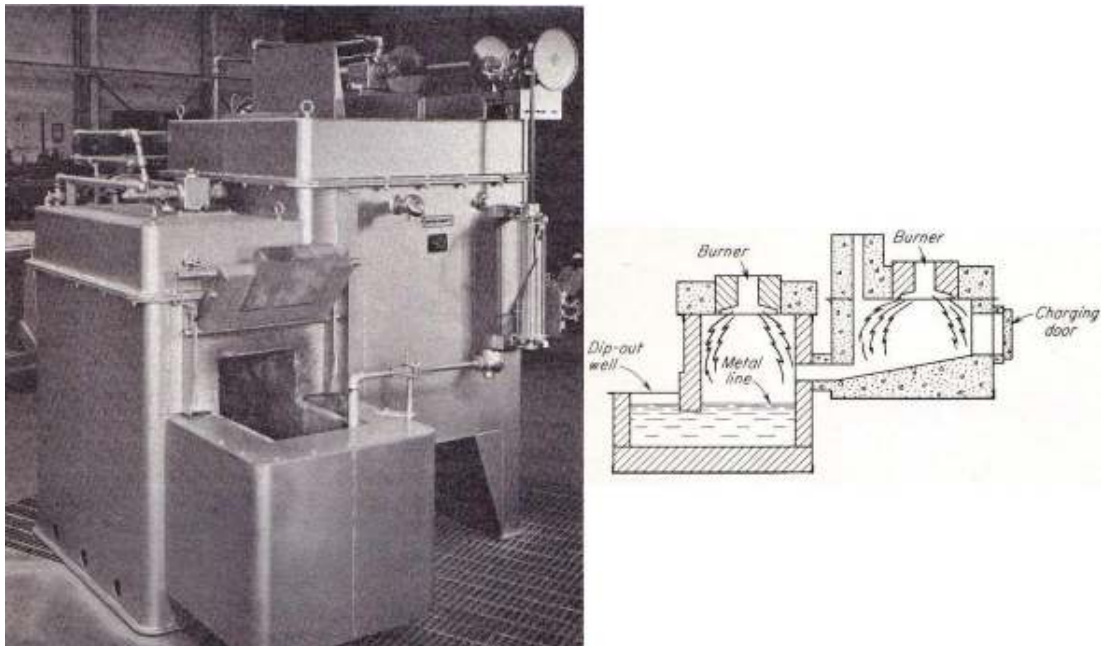
Se puede utilizar varios tipos de horno, hornos de crisol, hornos de inducción eléctrica o como el que se muestra en la ilustración 8, hornos en los que se

⁶ Moldeador: Persona encargada de verter el aluminio en los moldes.

⁷ Colada: Nombre que se le da al metal cuando está en fase liquida.

introduce el aluminio por la parte posterior, para entrar a una recamara donde se funde por medio de un quemador de aceite de petróleo o gas natural, para luego pasar por gravedad a otra recamara donde por medio de otro quemador similar, el aluminio se mantiene liquido y a una temperatura controlada y donde se asoma por un pozo para poder ser recogido por el moldeador.

Ilustración 8. Horno de fundición por medio de quemadores.



HEINE, 1967

6.2. LA MAQUINA BASCULANTE

La maquina basculante en la fundición de aluminio por coquilla semiautomática es la que se encarga de soportar el molde por medio de un sistema de amarre, en el que cada lado del molde hembra y macho respectivamente son sujetos a la maquina, para posteriormente ser alineados y asegurados. La maquina basculante posee dos pistones hidráulicos, uno que rota el molde 90° de una posición en la que recibe el aluminio fundido, a otra posición en la que el molde se ha llenado y cumple el tiempo de solidificación.

El otro pistón se encarga de abrir y cerrar el molde. Al ser accionada la maquina por parte del operario luego de éste haberle introducido el aluminio fundido, se activa un control de tiempo que comienza a contar el ciclo de solidificación de la pieza y luego de adoptar la posición final de llenado y esperar el tiempo correspondiente a la solidificación, el sistema se abre automáticamente para que la pieza pueda ser extraída.

Ilustración 9. Secuencia de movimiento de la maquina basculante.



SENATOR TECHNOLOGY®, 2005

6.3. EL MOLDE DE FUNDICIÓN

El molde para fundición de aluminio por coquilla se puede dividir en lado macho y lado hembra principalmente, el lado hembra se ancla sobre el extremo fijo de la maquina basculante, ya que éste solo contiene la hembra del molde y la coquilla y no requiere realizar ningún movimiento más que el de 90° que hace la maquina.

Por otra parte, el lado macho del molde es quien posee los canales de alimentación al igual que el sistema de expulsión y recuperación, por lo que se encuentra ubicado en la parte móvil de la maquina, que al hacer el movimiento de apertura acciona los pines expulsores que son los que empujan la pieza para que pueda ser retirada. Posteriormente al cerrarse el molde los pines recuperadores hacen contacto con el lado hembra del molde, para que los pines expulsores regresen a su posición original. Los sistemas de funcionamiento del molde serán explicados detenidamente cuando se describa el molde desarrollado para este proyecto.

Cuando se va a utilizar un molde debe hacerse inicialmente un precalentamiento del mismo, que le permita al aluminio llenar el molde uniformemente y que no se solidifique antes de tiempo por un alto gradiente de temperatura entre este y el molde.

Antes de comenzar a llenar el molde con el aluminio se debe aplicar dos clases distintas de pintura a las cavidades, una pintura desmoldante para evitar que las piezas se queden pegadas al molde, y una pintura que permite dar una mejor apariencia a las piezas fabricadas, ambas requieren una formulación especial para trabajar a altas temperaturas.

El diseño de los canales de alimentación del molde debe permitir que el llenado se dé en forma ascendente, es decir, que el aluminio inicialmente llegue hasta el fondo del molde para luego ir subiendo laminarmente⁸ por la cavidad hasta llenar todo el espacio y que adicionalmente pueda expulsar los gases por los respiraderos, evitando así los defectos en las piezas fabricadas.

⁸ Laminarmente: Comportamiento de un flujo laminar o lento, no turbulento.

Ilustración 10. Molde para fundición de aluminio por coquilla.



FINITE SOLUTIONS 2006

Ilustración 11. Llenado del molde permanente.



CARRIZOSA, 2006

6.4. ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN

Se debe utilizar una aleación de acuerdo a los porcentajes de los elementos aleantes que se requiera para el caso específico, ya que dentro de la amplia gama de aleaciones de aluminio que existen, la mayoría de las veces reciben su nombre por parte de la empresa que las ha desarrollado, esto hace que sea complicado encontrar una aleación que se ajuste a las necesidades del caso.

Para el caso de la fundición con molde permanente, se requiere una aleación que contenga entre un 4% y un 8% de silicio, dado que entre mayor sea la cantidad de silicio en la aleación, menor será el tamaño de grano y por ende será mejor la apariencia del artículo, debe evitarse el exceso en el Silicio, dado que entre mayor sea la cantidad de este en la aleación, más difícil será lograr sacar piezas sin defectos.

En la tabla 1 se pueden ver las características de la aleación de aluminio A 380, para moldeo permanente que posee una densidad de 2.7 g/cm^3 y se ajusta a los requerimientos del proceso.

Tabla 1. Propiedades de la aleación de aluminio A 380.

Mechanical Properties

Hardness, Rockwell B	45	45	Estimated from Brinell Hardness.
Hardness, Vickers	85	85	Estimated from Brinell Hardness.
Ultimate Tensile Strength	<u>Min 228 MPa</u>	Min 33000 psi	AA
Tensile Yield Strength	<u>Min 103 MPa</u>	Min 15000 psi	AA; 0.2% Offset
Elongation at Break	<u>Min 4.5 %</u>	Min 4.5 %	AA; in 2 in. (50 mm) or 4D
Modulus of Elasticity	<u>71 GPa</u>	10300 ksi	In Tension; elastic modulus in compression is typically about 2% higher for aluminum alloys.
Poisson's Ratio	0.33	0.33	
Shear Modulus	<u>26.5 GPa</u>	3840 ksi	
Shear Strength	<u>139 MPa</u>	20200 psi	Calculated

Thermal Properties

Heat of Fusion	<u>389 J/g</u>	167 BTU/lb
Specific Heat Capacity	<u>0.963 J/g-°C</u>	0.23 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	<u>126 W/m-K</u>	874 BTU-in/hr-ft ² -°F
Melting Point	521 - 627 °C	970 - 1160 °F
Solidus	<u>521 °C</u>	970 °F
Liquidus	<u>627 °C</u>	1160 °F

Processing Properties

Melt Temperature	677 - 816 °C	1250 - 1500 °F
Casting Temperature	677 - 788 °C	1250 - 1450 °F

Component	Wt. %	Component	Wt. %	Component	Wt. %
Al	80.3 - 89.5	Mn	Max 0.5	Si	7.5 - 9.5
Cu	3 - 4	Ni	Max 0.5	Sn	Max 0.35
Fe	Max 1.3	Other, total	Max 0.5	Zn	Max 3
Mg	Max 0.1				

MATWEB®, 2007

7. CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO DEL MOLDE DE FUNDICION DE ALUMINIO POR COQUILLA

Al desarrollar un molde para fundición por coquilla se deben tener en cuenta una gran cantidad de aspectos que cubren varias áreas de la ingeniería, y todos estos deben ser consecuentes entre sí para obtener un resultado óptimo, desde los materiales escogidos para la fabricación de las piezas, hasta el diseño de los canales de alimentación, para que el llenado del molde sea correcto.

7.1. UTILIZACION DE PIEZAS ESTANDAR

Para el molde que se trabaja en este proyecto, al igual que para cualquier molde, hay unas normas estandarizadas especialmente en cuanto a dimensiones de las placas que lo componen, ya que al ir montado en una maquina basculante, se deben respetar las restricciones de espacio que esta presenta, de igual forma se debe considerar la profundidad del articulo a fabricar, dado que la máquina tiene un máximo de abertura que debe ser suficiente para que la pieza salga fácilmente del molde.

Es necesario identificar las piezas estándar que la compañía utiliza en sus moldes, en este caso, la tornillería, bujes y pernos guía, pines expulsores, los separadores que se utilizan entre las placas, las coquillas y todos los demás elementos que puedan ser iguales para todos los moldes de una misma planta, con lo que se agiliza el mantenimiento y ensamble de los mismos y además se reducen los costos.

7.2. MATERIALES EN LA FABRICACIÓN DEL MOLDE

Se debe tener especial cuidado al escoger los materiales de los cuales se componen cada una de las piezas del molde. Para este caso se deben utilizar materiales con buena resistencia a las altas temperaturas, especialmente en el macho y la hembra, que preferiblemente se deben fabricar en un acero que además de tener buena resistencia a la temperatura, resista la presión de cierre del molde y la del llenado con aluminio. En este caso por ser llenado gravimétrico no es muy significativa la presión que ejerce el aluminio al interior de la cavidad. Para dicho fin generalmente se utiliza un acero de herramientas AISI O1, material con gran resistencia al choque térmico, de muy buena maquinabilidad y que permite ser endurecido fácilmente (MATWEB®, 2007).

Tabla 2. Propiedades del acero AISI O1.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	<u>7.83 g/cc</u>	0.283 lb/in ³	
Mechanical Properties			
Hardness, Knoop	537	537	Converted from Rockwell C hardness.
Hardness, Rockwell C	50	50	
Hardness, Vickers	517	517	
Tensile Strength, Ultimate	<u>1690 MPa</u>	245000 psi	
Tensile Strength, Yield	<u>1500 MPa</u>	218000 psi	
Elongation at Break	<u>0 %</u>	0 %	in 50 mm
Modulus of Elasticity	<u>214 GPa</u>	31000 ksi	
Bulk Modulus	<u>140 GPa</u>	20300 ksi	Typical for steel
Poisson's Ratio	0.3	0.3	Calculated
Shear Modulus	<u>82 GPa</u>	11900 ksi	Estimated from elastic modulus
Thermal Properties			
CTE, linear 250°C	<u>10.8 µm/m-°C</u>	6 µin/in-°F	38 - 260°C
CTE, linear 500°C	<u>14 µm/m-°C</u>	7.78 µin/in-°F	38 - 540°C

MATWEB®, 2007

Para las placas que soportan el macho y la hembra normalmente se utiliza fundición gris, igualmente para las placas que sostienen al molde dentro de la maquina basculante, la placa expulsora y la coquilla. Este material es bastante utilizado ya que su costo es significativamente menor que el de el acero. Resiste altas temperaturas, tiene muy buena maquinabilidad y permite ser tratado térmicamente para aumentar su dureza hasta 50 Rockwell C.

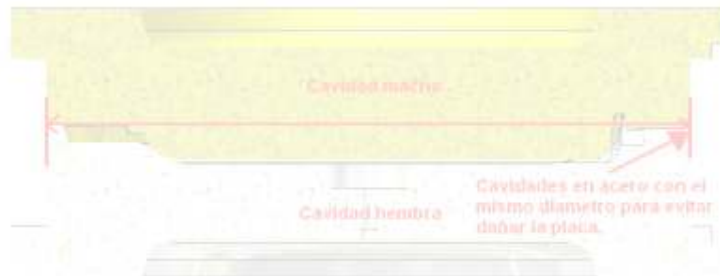
Tabla 3. Propiedades del hierro gris.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	<u>7.15 g/cc</u>	0.258 lb/in³	Typical for Gray Cast Iron
Mechanical Properties			
Hardness, Rockwell C	20	20	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Vickers	246	246	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	<u>Min 276 MPa</u>	Min 40000 psi	
Ultimate Compressive Strength	<u>Min 1034 MPa</u>	Min 150000 psi	
Machinability	<u>0 %</u>	0 %	Very good machinability. No numerical rating available.

MATWEB®, 2007

Se debe tener especial cuidado cuando se combinan materiales como el acero y la fundición gris dentro del molde. Si el macho y la hembra están fabricadas en acero, y las placas que los soportan en fundición gris, se debe considerar que al cerrarse el molde, la hembra y el macho solo tengan contacto entre ellos mismos, y no que uno de los dos sea más grande que el otro. Esto ya que al ser más duro el acero que la fundición gris, puede producirse desgaste en las placas por efectos de la fuerza de cierre. En la ilustración 12 se muestra como deben coincidir la hembra y el macho de un molde para evitar el desgaste de las placas que los soportan.

Ilustración 12. Coincidencia entre la hembra y el macho del molde.



CARRIZOSA, 2006

7.3. CANALES DE ALIMENTACIÓN

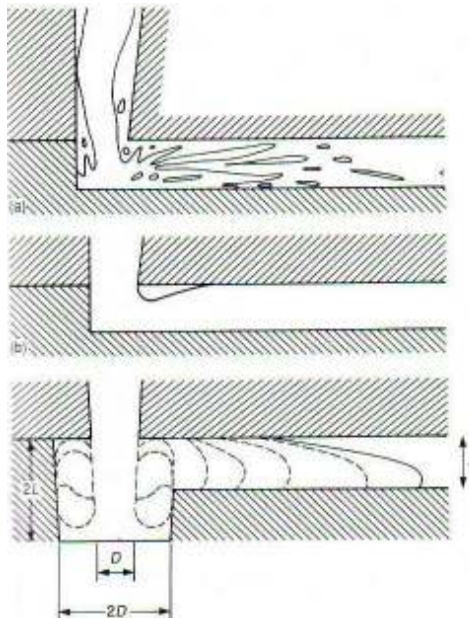
El aspecto más importante a tener en cuenta al desarrollar un molde de fundición es el diseño de los canales de alimentación. De la buena disposición de estos depende el correcto llenado de la pieza, al igual que la reducción en los tiempos de fabricación. En la fundición por gravedad no se han desarrollado grandes estudios en cuanto a cómo deben estar fabricados dichos canales, pero por la experiencia se puede llegar a diseños que mejoran la productividad y permiten sacar un gran porcentaje del total de la producción con muy buena factura obteniendo productos económicos y de gran calidad (CAMPBELL, 1991).

7.3.1. ELEMENTOS EN UN SISTEMA DE CANALES DE ALIMENTACIÓN

- Economía en el tamaño. Entre menor sea el peso del aluminio en los canales de alimentación en proporción al peso total de la pieza resultante (producto + canales), se podrán producir más artículos con el aluminio que se tenga, adicionalmente se debe considerar que por cada pieza que se produce, aproximadamente el 7% de este se oxida y se evapora, por lo que es importante evitar consumir aluminio en los canales para reducir el material de reproceso (CAMPBELL, 1991).

- El llenado del molde a la velocidad requerida. El moldeador se encarga de regular la velocidad a la que la maquina basculante hace la rotación, modificando la presión del aceite en el pistón de la maquina. Sin embargo es importante saber que la velocidad adecuada para que el aluminio fluya laminarmente dentro del molde y no se generen turbulencias y salpicaduras que generen defectos en la pieza, es de entre 0.25m/s y 0.5m/s ya que si la velocidad de éste se acerca a 1m/s es muy probable que las piezas salgan defectuosas (CAMPBELL, 1991).
- Eliminación de la turbulencia. Aunque la velocidad de llenado sea la adecuada, cuando se introduce en un primer instante el aluminio por los canales de alimentación, éste baja velozmente hasta el fondo de la cavidad y el frente de flujo choca con el molde, por lo que se produce turbulencia y salpicaduras. Para atenuar este efecto se debe ubicar una depresión o “pozo” en la zona en que el aluminio choca con el molde, esto permite amortiguar el choque del frente de flujo contra la superficie del molde, como se puede ver en la imagen c de la ilustración 13.

Ilustración 13. Frentes de flujo interactuando con el molde.



CAMPBELL, 1991

- Fácil desmolde. Aunque generalmente a la hora de desmoldar la pieza no se presenta mayor dificultad con los canales de alimentación, pues la geometría más compleja por lo general la posee la pieza, es válido anotar la importancia de diseñar amplios ángulos de desmolde y evitar las aristas vivas, siempre agregando redondeos para que el aluminio no quede amarrado.
- De fácil remoción. Se debe tener en cuenta que luego de dar forma a la pieza deseada los canales deben ser removidos, por lo que se deben diseñar de tal forma que puedan ser retirados ágilmente con las herramientas que para tal fin se cuenta. El contacto del canal con la pieza debe ser solamente el necesario para garantizar un adecuado llenado de la misma.

7.3.2. FUNCION DE LAS PUERTAS (GATES)

A las partes de los canales de alimentación que sirven de interface uniendo a los canales principales con la pieza se les conoce como puertas (gates). Están diseñadas para hacer que el aluminio entre laminarmente a la pieza, evitando el efecto fuente o splash y permitiendo que se dé un llenado parejo y ascendente. Todo esto se logra reduciendo la profundidad del canal en la parte superior, logrando que en el primer instante en el que el aluminio entra en el molde agresivamente, no haya contacto entre éste y la pieza, sino hasta que el frente de flujo haya logrado reducir su velocidad al entrar en contacto con el pozo y comience el llenado laminar y ascendente de la cavidad.

7.4. EVACUACIÓN DE GASES

El sistema de evacuación de gases en un molde de fundición por coquilla, es uno de los elementos más importantes a tener en cuenta. Si no se tiene una rápida y adecuada evacuación del aire y los gases presentes al interior del molde en el

momento del llenado, se van a presentar defectos en las piezas tales como Macro porosidades (rechupes), burbujas e inclusive perforaciones en las superficies.

Las entradas de los canales no son suficientes para la evacuación del aire y los gases, por lo que se requiere de respiraderos principalmente en la parte superior de la cavidad del molde que tengan un espesor tal que no le permita al aluminio salirse por estos.

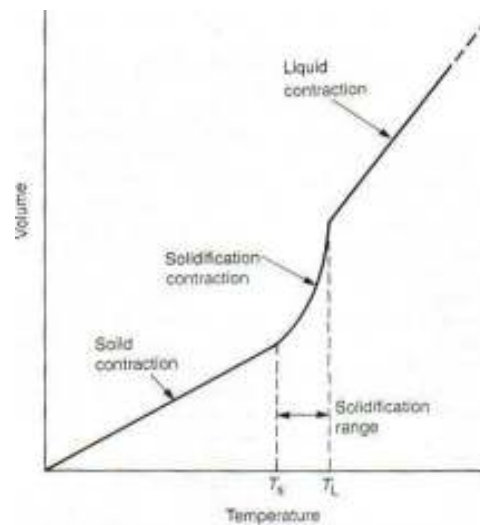
7.5. CONTRACCIONES

Al diseñar una pieza para fundición de aluminio por coquilla, a su tamaño original se le debe multiplicar por un factor de contracción debido a que al solidificarse el aluminio, la pieza se encoje aproximadamente en un 7%. Adicionalmente, al fabricar el macho y la hembra en acero O1, se debe considerar que este material también sufre una contracción al someterse a los tratamientos térmicos en el proceso de fabricación de aproximadamente 2%.

Por tanto cuando se realiza el diseño del artículo se debe escalar su tamaño aumentándolo en un 9% para que cuando se desarrollen las cavidades en acero y se les haga los tratamientos térmicos respectivos, quede equilibrado el factor de contracción, y para que cuando se estén produciendo las piezas en aluminio, éstas salgan del tamaño requerido.

En la ilustración 14 se puede ver un esquema de como se reduce el volumen del material a medida que se reduce la temperatura, adicionalmente en la tabla 4 se muestran los factores de contracción para algunos metales.

Ilustración 14. Esquema de contracción en tres regímenes.



CAMPBELL, 1991

Tabla 4. Contracciones de solidificación para algunos metales.

<i>Metal</i>	<i>Crystal structure</i>	<i>Melting point °C</i>	<i>Liquid density (kg/m³)</i>	<i>Solid density (kg/m³)</i>	<i>Volume change (%)</i>	<i>Ref.</i>
Al	fcc	660	2 368	2 550	7.14	1
Au	fcc	1063	17 380	18 280	5.47	1
Co	fcc	1495	7 750	8 180	5.26	1
Cu	fcc	1083	7 938	8 382	5.30	1
Ni	fcc	1453	7 790	8 210	5.11	1
Pb	fcc	327	10 665	11 020	3.22	1
Fe	bcc	1536	7 035	7 265	3.16	1
Li	bcc	181	528	—	2.74	4, 5
Na	bcc	97	927	—	2.6	4, 5
K	bcc	64	827	—	2.54	4, 5
Rb	bcc	39	1 437	—	2.3	4, 5
Cs	bcc	29	1 854	—	2.6	4, 5
Tl	bcc	303	11 200	—	2.2	2
Cd	hcp	321	7 998	—	4.00	2
Mg	hcp	651	1 590	1 655	4.10	3
Zn	hcp	420	6 577	—	4.08	2
Ce	hcp	787	6 668	6 646	−0.33	1
In	fcc	156	7 017	—	1.98	2
Sn	tetrag	232	6 986	7 166	2.51	1
Bi	rhomb	271	10 034	9 701	−3.32	1
Sb	rhomb	631	6 493	6 535	0.64	1
Si	diam	1410	2 525	—	−2.9	2

CAMPBELL, 1991

8. PROPUESTAS DE DISEÑO PARA EL ARTÍCULO A FABRICAR CON EL MOLDE

Para este proyecto se decidió desarrollar un diseño nuevo de sartén fundido en aluminio, al que se le pudiese ensamblar el mango directamente y sin necesidad de un accesorio intermedio conocido como “para-llamas”. No se tiene un diseño preliminar de este sartén por lo cual la primera etapa del proyecto se refiere a la realización de la propuesta de diseño para el desarrollo del molde y el análisis con el software especializado en procesos de fundición.

El desarrollo de esta modelación se hace con la ayuda de el software de diseño asistido por computador (CAD⁹) *SolidWorks 2007*, que facilita en gran medida dar forma a las propuestas, ya que posee un sinnúmero de herramientas como es el modulo de modelado mediante superficies, ideal para trabajar geometrías complejas.

La propuesta tiene una forma levemente ovalada y el elemento más significativo que posee es que a la mitad de su altura en la parte exterior tiene un escalón, que le proporciona un mayor atractivo visual.

⁹ CAD: Siglas para Computer Asisted Design

Ilustración 15. Render del sartén ovalado en isométrico.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 16. Render del sartén ovalado de perfil.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 17. Render del sartén ovalado vista inferior.



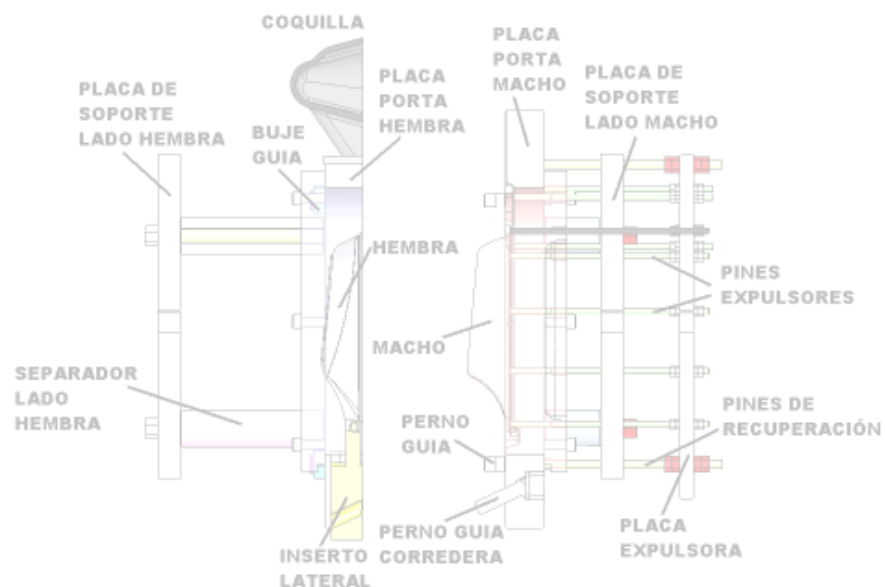
CARRIZOSA, 2007

9. DESARROLLO DEL MOLDE PARA FUNDICION DE ALUMINIO POR COQUILLA

Luego de conocer los parámetros a seguir para el desarrollo de un molde para fundición de aluminio por coquilla, se comienza la etapa donde se realiza la modelación del molde, partiendo del sartén seleccionado, hasta llegar al ensamble del molde con todos sus elementos constituyentes. Adicionalmente se desarrolla los planos para el molde y para la propuesta de diseño, que pueden ser vistos en los archivos anexos.

Para entender más fácilmente y ubicarse mejor dentro de las explicaciones, en la siguiente ilustración se muestra un corte de perfil del molde completo nombrando las principales piezas que lo constituyen.

Ilustración 18. Corte en sección del molde con el nombre de las piezas.



CARRIZOSA, 2007

9.1. CAVIDADES DEL MOLDE

Se comienza con la extracción de cavidades para el sartén ovalado. Para efectuar esta extracción se utiliza el modulo de moldes de *SolidWorks*. Lo primero que se hace es un escalado de la pieza para contrarrestar los efectos de la contracción del aluminio del acero de las cavidades al solidificarse.

Posteriormente el software permite indicar una línea de separación, con la que se hace la extracción del macho y la hembra. El software hace un análisis de ángulo de salida para advertir si existe algún problema con la línea de separación planteada. En la ilustración 22 se observa el análisis de ángulo de salida de la pieza, el color verde indica que no hay contrasalidas en la dirección del macho, el color rojo lo respectivo para la hembra y el amarillo, que no hay ángulo de salida.

Ilustración 19. Análisis del ángulo de salida en la pieza.



CARRIZOSA, 2007

Como se observa en la ilustración 22, el sartén tiene un par de orificios en donde se ensambla con el mango. Esto debido a que como el ensamble es directo, el mango debe tener dos protuberancias que ensamblan en los dos orificios para poder soportar la carga del sartén. Para poder fabricar las dos cavidades se requiere de un inserto lateral en la hembra del molde, para el cual se debe desarrollar un sistema de corredera el cual se explicara detenidamente más adelante.

9.1.1. MACHO DEL MOLDE

Al realizar la extracción del macho y la hembra, se comienza a trabajar en la adecuación de los mismos. El macho va en el lado del molde que contiene los canales de alimentación, el sistema de expulsión de gases y de expulsión de la pieza al igual que las puertas (gates) de entrada del aluminio entre los canales y la pieza.

El diseño del macho está desarrollado de tal forma que pueda sujetarse a la placa porta-macho por medio de pernos. En la ilustración 23 se puede observar el anillo con el cual se fija el macho a la placa y las perforaciones por donde pasan los pernos de amarre. Puede verse también la cavidad que tiene por detrás que sirve tanto para reducir el peso como para evitar que se concentre demasiado calor en el macho. Igualmente se puede ver la profundidad de la puerta de entrada entre los canales de alimentación y la pieza.

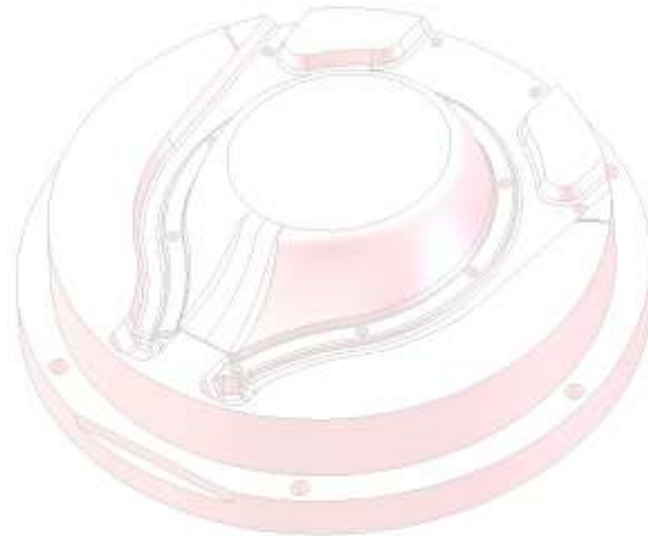
Ilustración 20. Corte en sección del macho del molde.



CARRIZOSA, 2007

En el macho del molde se encuentran distribuidos equidistantemente los orificios donde se ubican los expulsores sobre la puerta de entrada del material y en algunos puntos del canal de alimentación. Esta ubicación busca distribuir uniformemente la fuerza que se realiza para expulsar el sartén evitando que se deforme o se rompa.

Ilustración 21. Vista del macho en isométrico.



CARRIZOSA, 2007

9.1.2. HEMBRA DEL MOLDE

Para la hembra se debe realizar, igual que en el macho, un anillo de amarre para poderla fijar a la placa porta hembra. En la ilustración 25 se puede ver que la hembra tiene un agujero lateral que da a la cavidad, en este agujero se ubica el inserto que conforma las perforaciones donde se ensambla el mango en el sartén.

Ilustración 22. Vista en isométrico de la hembra del molde.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 23. Vista superior de la hembra del molde.



CARRIZOSA, 2007

9.2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

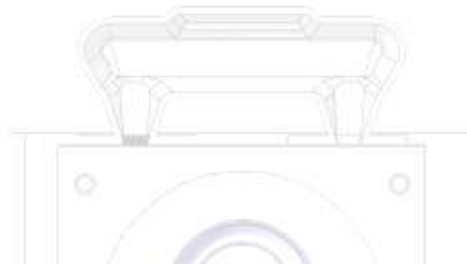
El sistema de alimentación del molde es el elemento más crítico dentro del desarrollo de cualquier molde de fundición. Del diseño de éste depende en gran medida que la cavidad llene o no adecuadamente. Para asegurar un adecuado llenado del molde propuesto en este proyecto, se realiza un análisis con un programa especializado en fundición del cual se hablará cuando se haga el análisis de llenado del molde.

Anteriormente realizar éste tipo de análisis no era posible, por lo que el diseño de los canales de alimentación se hacía y aún se hace con base en la experiencia, en el ensayo y error, y con las nociones que se tenga de dinámica de fluidos.

Ahora se entra a describir como están diseñados los canales de alimentación para el molde del sartén. Parte de los canales se encuentran en la placa porta-macho y parte en el macho.

La única pieza del sistema de alimentación que se encuentra en el lado hembra del molde es la coquilla, que recibe el aluminio para luego llenar los canales.

Ilustración 24. Coquilla en el lado hembra del molde.



CARRIZOSA, 2007

Al entrar el aluminio depositado en la coquilla al molde, es recibido por los embudos o conicidades que lo direccionan y enfocan hacia el interior de los canales al reducirse la sección transversal. Este proceso puede verse en la ilustración 28, en una imagen de frente y un corte lateral del ensamble con la coquilla.

Ilustración 25. Vista frontal y corte lateral de la boca de entrada de material.



CARRIZOSA, 2007

Al diseñar los canales se debe tener en cuenta que el frente de flujo del aluminio al llegar al fondo del canal, debe ser amortiguado por un pozo o depresión que impida que se generen grandes turbulencias que puedan afectar la calidad superficial de la pieza. En la ilustración 29 se ve un corte lateral del canal donde se señalan las profundidades del canal principal, del pozo y de la puerta de entrada del material hacia la pieza.

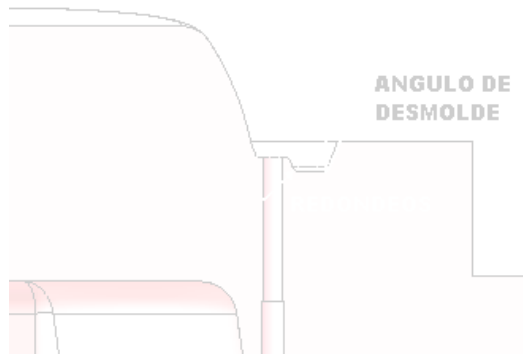
Ilustración 26. Diferentes alturas en el canal de alimentación del molde.



CARRIZOSA, 2007

Se deben implementar ángulos de desmolde y redondeos en el fondo de los canales de alimentación como se muestra en la ilustración 30, para evitar que se amarren las piezas al ser expulsadas, generando complicaciones en el proceso.

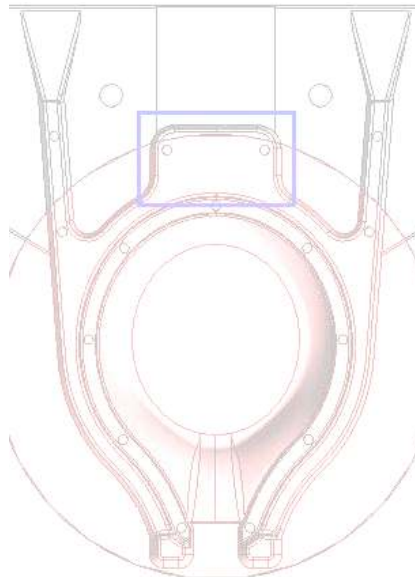
Ilustración 27. Vista en sección del canal de alimentación con consideraciones para el desmolde.



CARRIZOSA, 2007

En la parte superior del macho se puede ver un área amplia de canal de alimentación (ilustración 31). Este espacio es muy importante debido a que es el último punto del molde en llenarse y es en el cuál se acumula el aire y los gases que van siendo desplazados por el aluminio en la cavidad.

Ilustración 28. Zona de llenado final de la pieza.

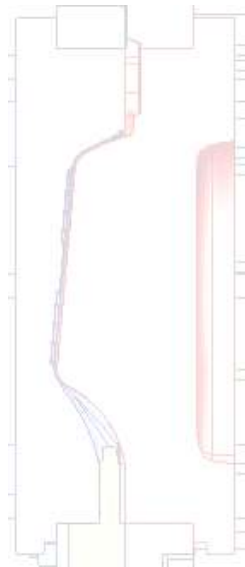


CARRIZOSA, 2007

En las ilustraciones 32 y 33 se pueden observar los canales de llenado del molde, desde un corte en vista lateral y un corte en vista superior respectivamente. En el corte en vista lateral se puede ver el inserto ubicado en el lado hembra del molde y de igual forma se ve la zona final de llenado en la parte superior.

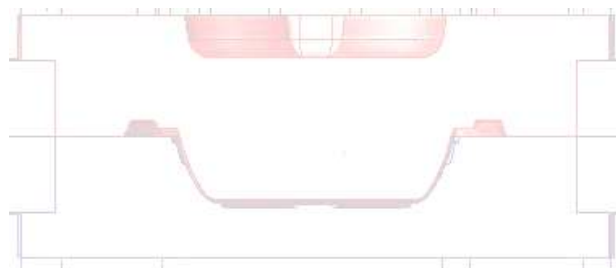
En el corte en vista superior se observa simétricamente el canal de alimentación y las puertas de entrada del aluminio a la pieza, al igual que el espacio a llenar por la pieza.

Ilustración 29. Corte en vista lateral de los canales de alimentación.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 30. Corte en vista superior de los canales de alimentación.



CARRIZOSA, 2007

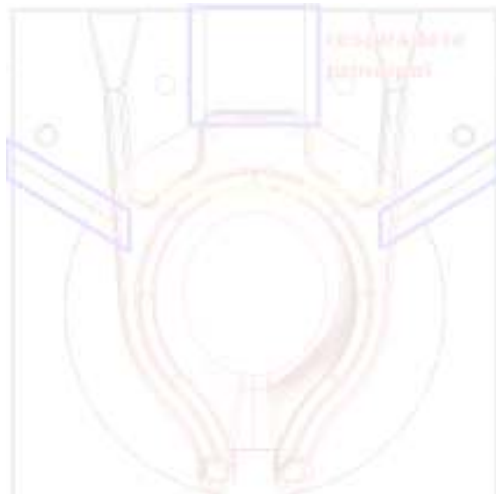
9.3. SISTEMA DE EVACUACION DE GASES

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el de la evacuación de los gases en la pieza, se debe buscar que no haya sitios dentro del diseño tanto de la pieza como de los canales, en los que el aire pueda quedar atrapado, porque dado el caso, esos espacios quedarán sin llenar y por tanto las piezas quedaran incompletas o defectuosas.

En la parte alta del canal que se muestra en la ilustración 31, es donde se acumulan la mayoría de los gases que van siendo desplazados al llenarse el molde. En este punto es donde se debe ubicar el respiradero principal.

Se pueden ubicar respiraderos adicionales tanto a los costados como en la parte inferior del molde. En la ilustración 34 se puede ver enmarcado en azul tanto el respiradero principal como los respiraderos laterales.

Ilustración 31. Sistema de respiraderos del molde.



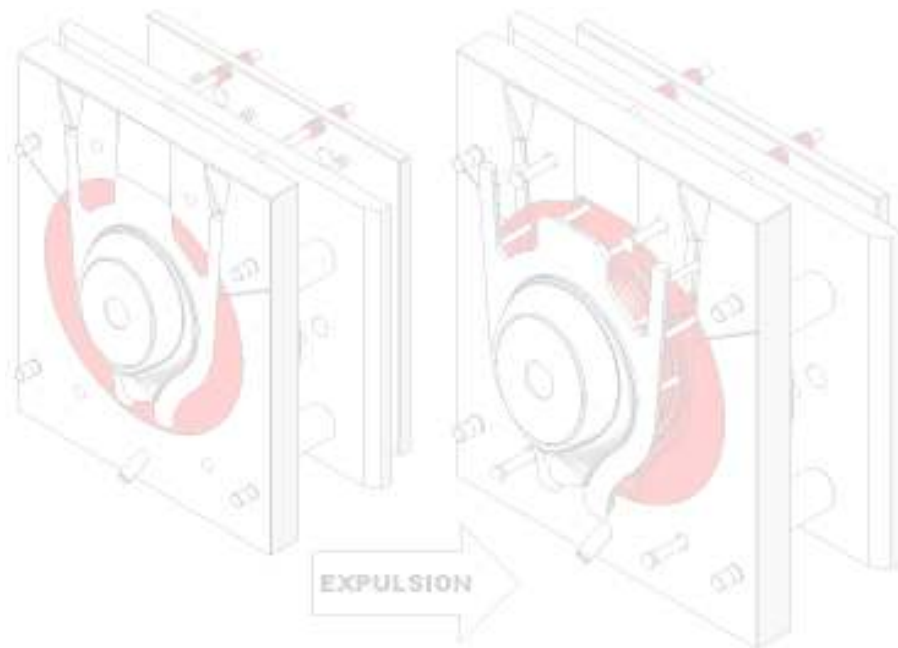
CARRIZOSA, 2007

9.4. SISTEMA DE EXPULSION Y RECUPERACIÓN

Para poder extraer la pieza luego de que se ha solidificado, al darse la apertura del molde, en la que el lado macho es el que se desplaza, la placa expulsora es presionada contra unos pernos anclados a la maquina basculante que la obligan a desplazarse en dirección del molde, lo que hace que los pines expulsores salgan y expulsen la pieza.

En la ilustración 35 se muestra el proceso de expulsión. En la primera imagen la pieza aún se encuentra adherida al macho, pero en la segunda imagen ya se ha presionado la placa expulsora por lo que se puede observar que los pines expulsores han salido y extraído la pieza.

Ilustración 32. Esquema de la expulsión de la pieza.



CARRIZOSA, 2007

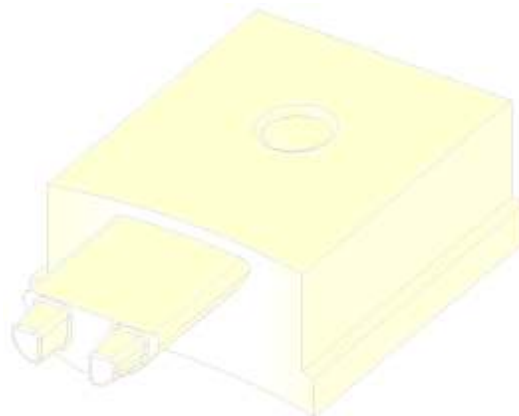
9.5. MECANISMO DE CORREDERA

Ya se ha dicho que el sartén se ensambla directamente con el mango y para esto se requiere un par de cavidades en la zona de empalme con el mango. Aquí se hace necesaria la utilización de un inserto lateral en el molde, el cual debe utilizar un mecanismo que permita tenerlo en posición mientras se llena y solidifica la pieza, y que luego lo desplace hasta una ubicación en la que no obstruya el desmolde al realizarse la apertura para sacar la pieza.

Existen muchos tipos de mecanismo para realizar este procedimiento, pero para el caso del molde del sartén se utiliza el sistema de corredera. Este sistema consta de unas guías entre la placa porta-hembra y el inserto que permiten que se desplace linealmente entre su posición normal y la de desmolde.

El desplazamiento está restringido por el movimiento de un perno guía inclinado, anclado a la placa porta-macho, que como se observa en la ilustración 37 al estar cerrado el molde, mantiene fijo el inserto en la posición normal y al abrirse (ilustración 38) empuja el inserto obligándolo a desplazarse hasta una posición en la que no interfiera en el desmolde de la pieza.

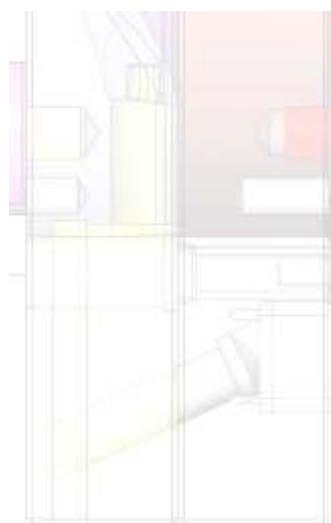
Ilustración 33. Inserto lateral del molde.



CARRIZOSA, 2007

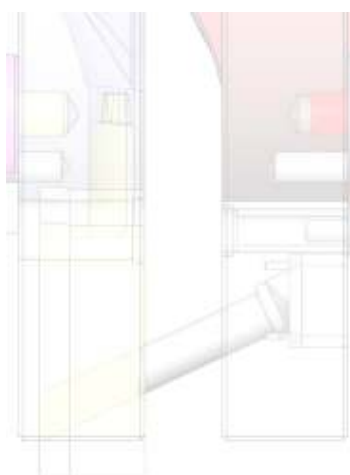
El perno guía se inserta por el lado posterior de la placa macho y tiene una conicidad en la cabeza con el mismo ángulo de inclinación para poder ser amarrado, quedando perfectamente fijo a la placa porta-macho por medio de una placa de selle con cuatro tornillos dentro del cajón, como se puede observar en las ilustraciones 37 y 38.

Ilustración 34. Sistema de corredera con molde cerrado.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 35. Sistema de corredera con molde abierto.

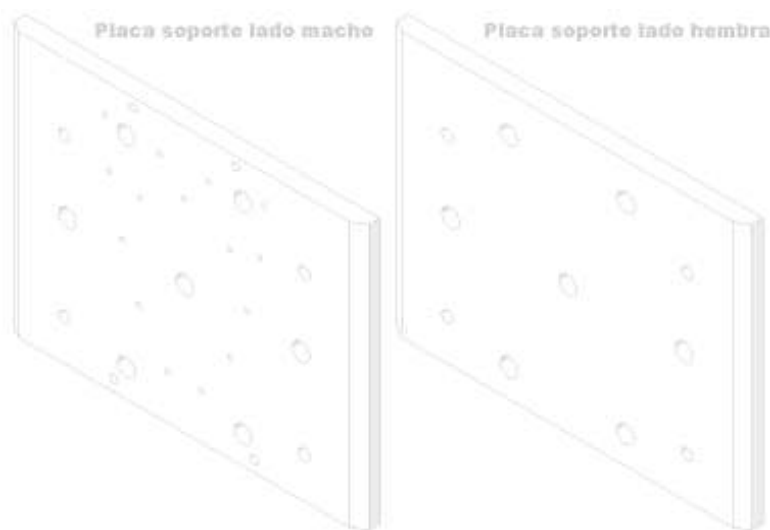


CARRIZOSA, 2007

9.6. SUJECION A LA MAQUINA BASCULANTE

Para poder fijar el molde a la maquina basculante, se sujeta de las placas de soporte por los costados que tienen un diseño que facilita su deslizamiento hasta la posición requerida, posteriormente el operario alinea las dos partes del molde y fija las placas de soporte.

Ilustración 36. Placas de soporte lado macho y hembra.



CARRIZOSA, 2007

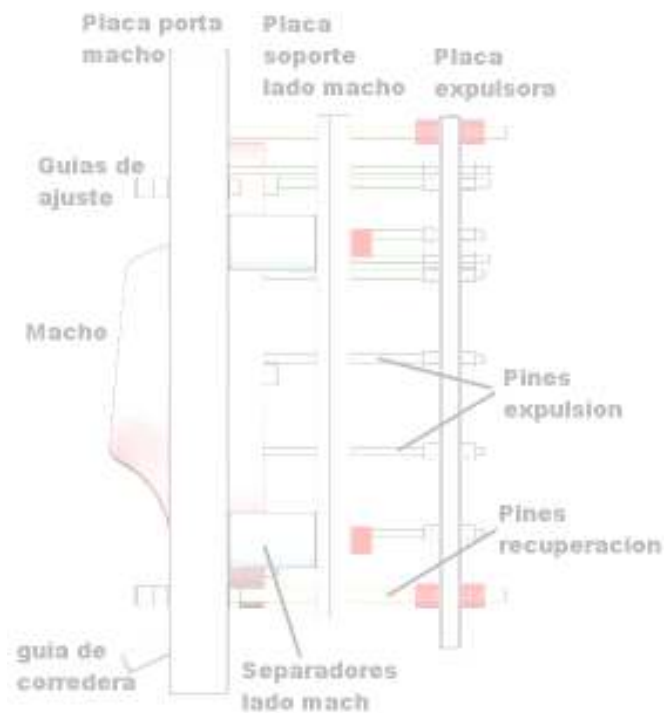
9.7. ENSAMBLE DEL MOLDE

Para el ensamble del lado macho del molde se comienza asegurando el macho a la placa porta-macho por medio de pernos. La placa de soporte se amarra a la placa porta-macho por medio de pernos largos introducidos a través de cilindros separadores que dan distancia entre las dos placas como se puede observar en la ilustración 40.

La placa expulsora debe tener desplazamiento para poder realizar los movimientos de expulsión y recuperación, por lo que a lo único que debe estar amarrada es a los pines de expulsión y recuperación, que son los que se deben

desplazar axialmente para cumplir su función. Es por medio de estos mismos pines que la placa expulsora se mantiene sostenida.

Ilustración 37. Componentes lado macho del molde.



CARRIZOSA, 2007

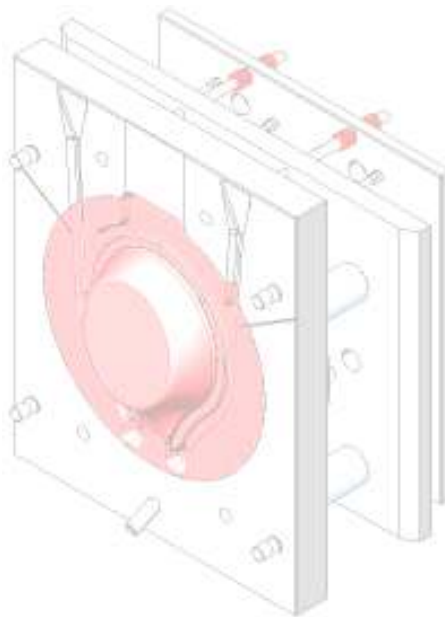
En la placa porta-macho también se ubican las guías de ajuste que al cerrar el molde se introducen en los bujes guía ubicados en la placa porta-hembra. De igual forma se encuentra el perno guía de la corredera que ajusta en el inserto lateral del molde.

Ilustración 38. Vista frontal lado macho del molde.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 39. Isométrico lado macho del molde.



CARRIZOSA, 2007

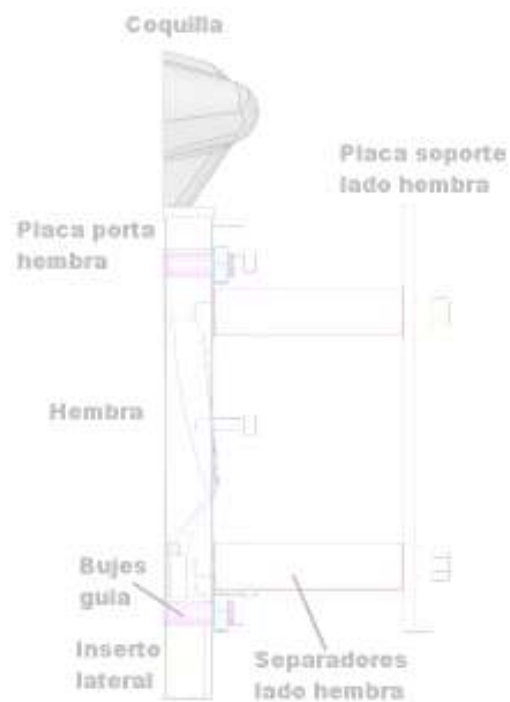
El lado hembra del molde que usualmente es el más simple de los dos lados, solo cuenta en este caso con el inserto lateral, que introduce un grado mayor de complejidad al molde.

Al igual que en el lado macho, la hembra se amarra a la placa porta-hembra mediante pernos, y la placa de soporte mediante bujes separadores y pernos largos que la sujetan a la placa porta-hembra.

El inserto lateral se ubica dentro de la placa porta-hembra por medio del sistema de corredera aplicado entre las dos partes y se desliza dentro de la hembra para llenar el espacio requerido para formar las perforaciones en la pieza.

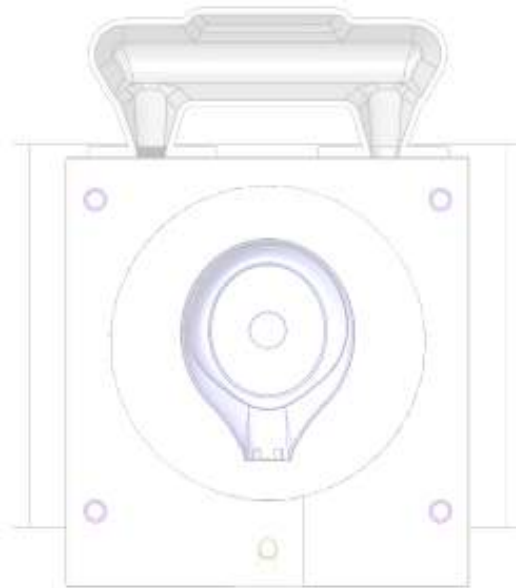
A la placa porta-hembra también se sujeta la coquilla en la parte superior.

Ilustración 40. Componentes lado hembra del molde.



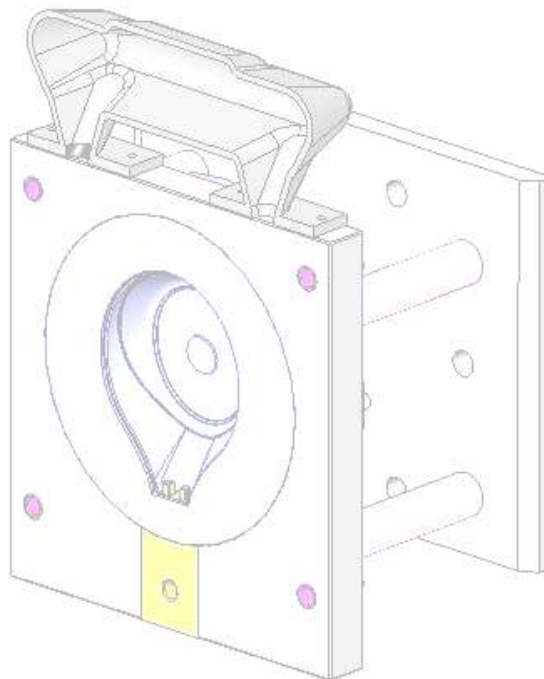
CARRIZOSA, 2007

Ilustración 41. Vista frontal lado hembra del molde.



CARRIZOSA, 2007

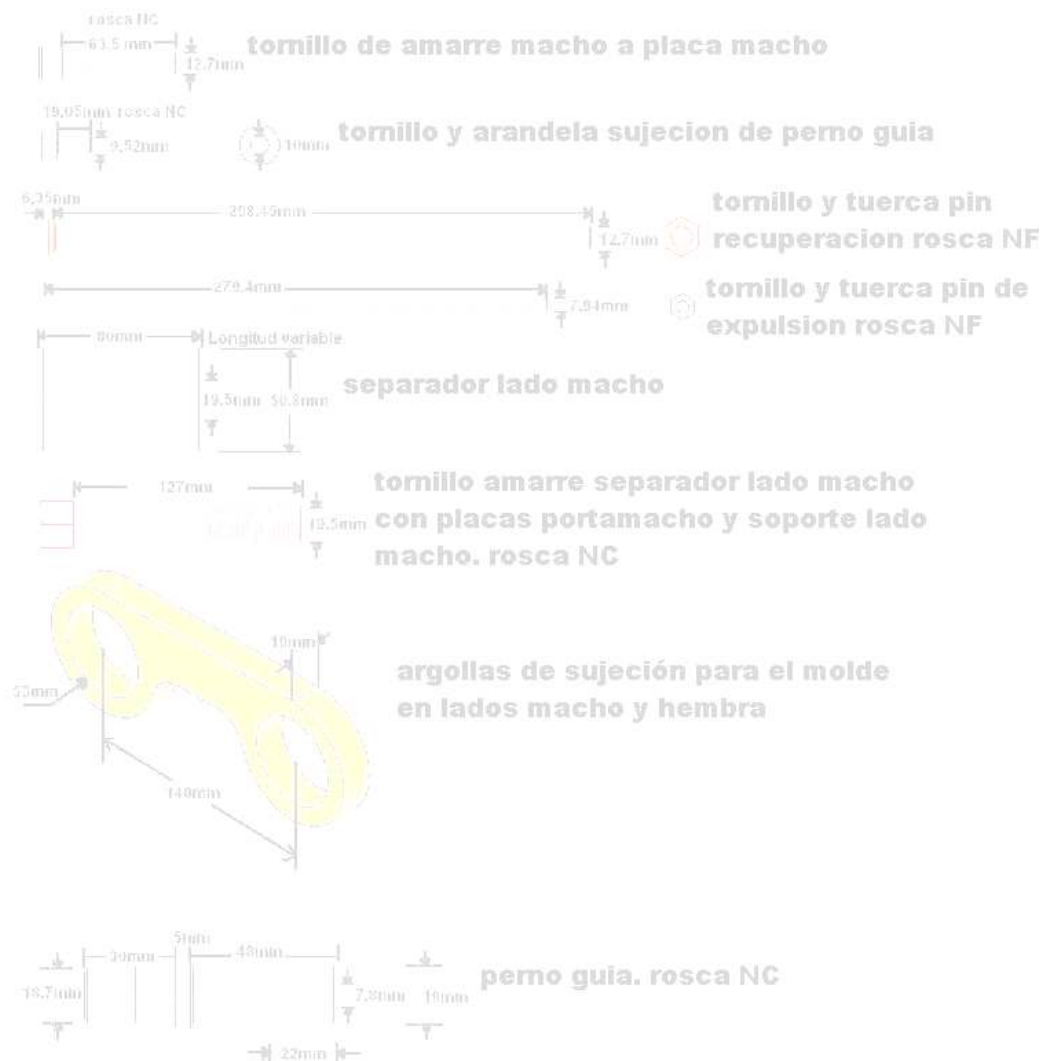
Ilustración 42. Isométrico del lado hembra del molde.



CARRIZOSA, 2007

Para el ensamble del molde se cuenta con una serie de piezas estándar que permiten fijar los componentes entre sí y hacer que el molde funcione correctamente. Se utilizan piezas como pernos, arandelas, ejes y bujes guía, etc. En las ilustraciones 46 y 47 se muestran todas las piezas estándar que contiene un molde de fundición para aluminio en coquilla.

Ilustración 43. Piezas estándar en el lado macho del molde.



CARRIZOSA, 2007

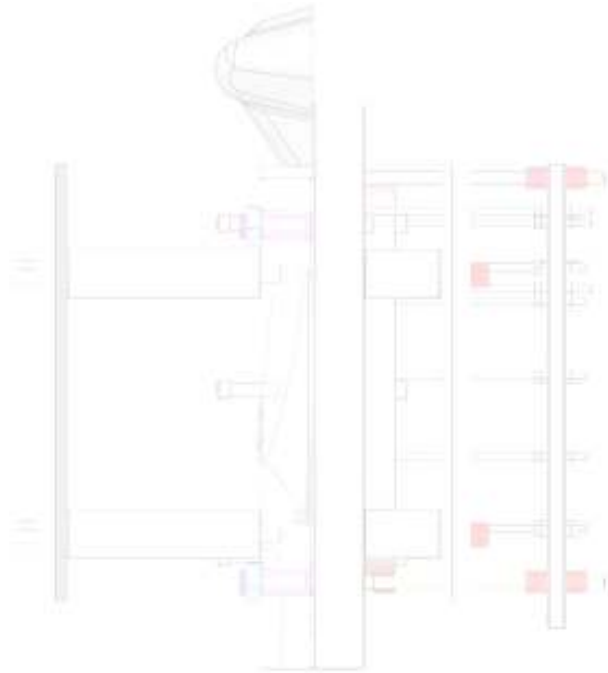
Ilustración 44. Piezas estándar en el lado hembra del molde.



CARRIZOSA, 2007

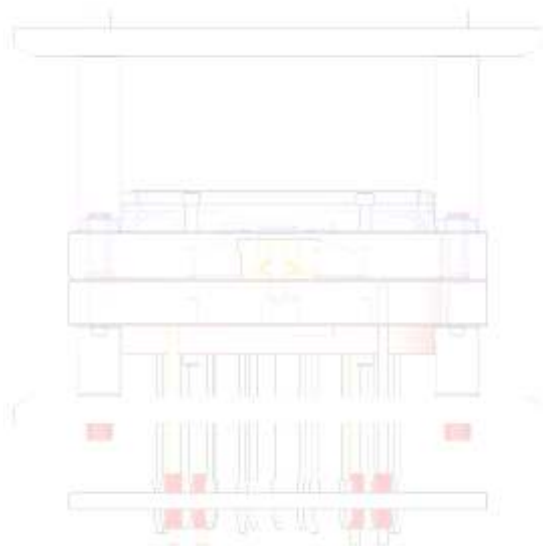
Al hacer el ensamble del molde se debe cuidar que el macho y la hembra coincidan perfectamente. Para esto se cuenta con los bujes y pernos guía en las placas porta-hembra y porta-macho respectivamente, que permiten una perfecta alineación para que las piezas salgan con el espesor requerido en cada parte. En la ilustración 48, la hembra, placa porta-hembra y el inserto lateral se pueden ver como transparencia, pero dentro de la placa porta-hembra se ven en color morado los bujes guía, que al estar cerrado el molde coinciden con los pernos guía del lado macho.

Ilustración 45. Vista de perfil del molde con transparencias en el lado hembra.



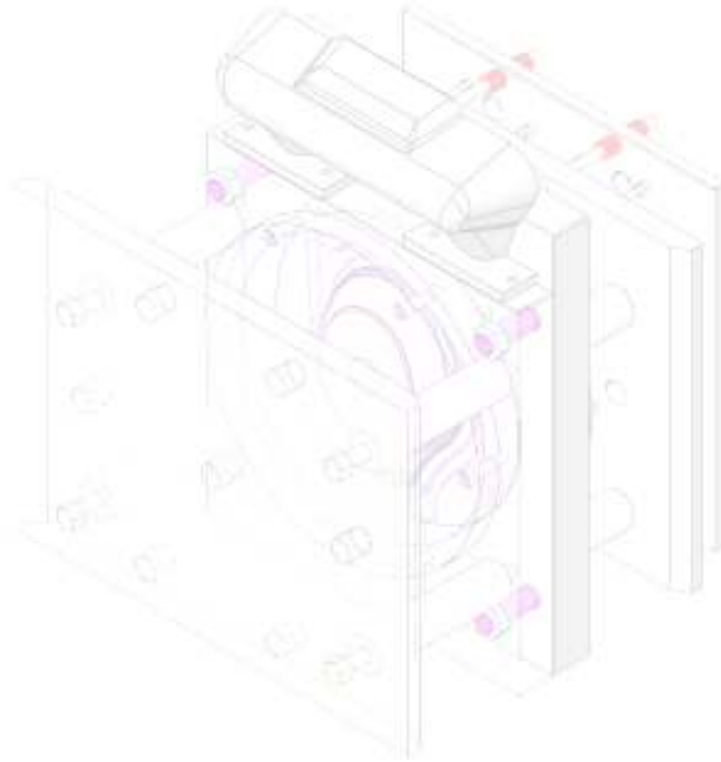
CARRIZOSA, 2007

Ilustración 46. Vista inferior del molde con transparencias en el lado hembra y placa porta macho.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 47. Isométrico del molde con transparencias en el lado hembra.



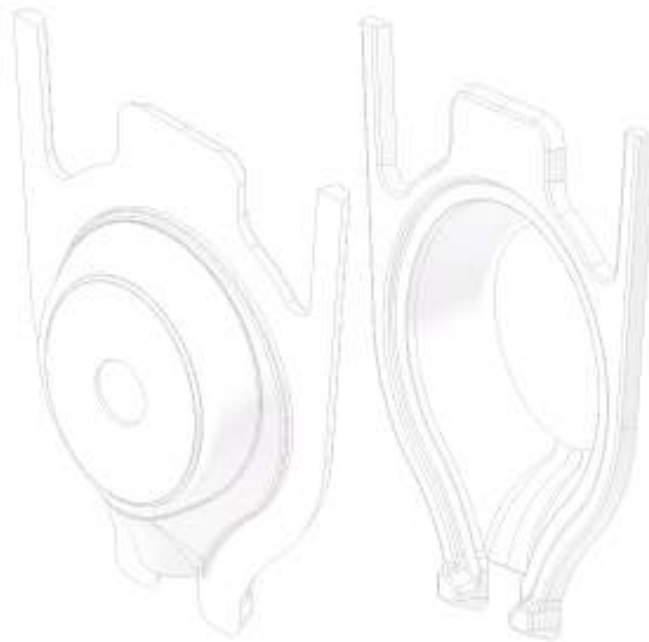
CARRIZOSA, 2007

10. ANALISIS DE LLENADO DEL MOLDE

Para el análisis de llenado del molde se cuenta con la modelación de la pieza resultante del proceso de fundición, el sartén unido a los canales de alimentación.

En las imágenes se observan las piezas a las que se les aplica el análisis, la primera con el diseño de canales desarrollado originalmente en el molde del sartén y la segunda como una posible alternativa al diseño propuesto.

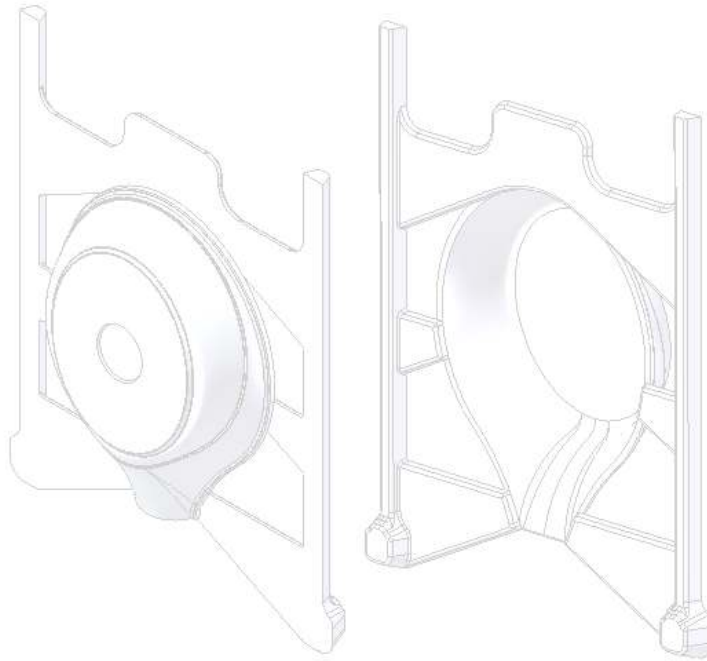
Ilustración 48. Pieza para análisis original.



CARRIZOSA, 2007

Con ayuda del software de modelación *SolidWorks* se determina que el peso de la pieza para análisis original es de 1,76Kg, mientras que el peso de la pieza para análisis alternativa es de 1,68Kg.

Ilustración 49. Pieza para análisis alternativo.



CARRIZOSA, 2007

10.1. FUNDAMENTACION TEORICA PARA EL ANALISIS DEL MOLDE

El análisis se desarrolla utilizando los softwares de simulación *SolidCast* y *FlowCast* de la compañía *Finite Solutions* que trabajan juntos compartiendo la información, parámetros y mallado que se ingrese inicialmente.

10.1.1. PARAMETRIZACION DEL ANALISIS

Este tipo de programas poseen métodos de cálculo desarrollados para procesar la información de entrada que sea suministrada por el usuario, y que muchas veces se encuentra predefinida en las mismas bases de datos del software, dependiendo de los materiales a utilizar y las características del proceso.

- Para el caso del sartén que trata este proyecto se escoge dentro de la base de datos del software como material para el llenado una aleación de aluminio A356 que tiene propiedades aptas para el proceso de moldeo permanente por gravedad. Si se desea se puede modificar la información que hay preexistente sobre la aleación. Para el caso se ha introducido una temperatura inicial del aluminio de 750°C, ya que es la temperatura a la que normalmente son llenados los moldes.

Ilustración 50. Información del aluminio para el llenado.

Materials List

Casting | Mold | Curves | HT Coefficients

From DB... To DB...

Attributes

Alloy Name	Al 356.0	
Thermal Conductivity	159,12	(W/m-K)
Specific Heat	962,3	(J/kg-K)
Density	2684,62	(kg/m^3)
Initial Temperature	750	(C)
Solidification Temperature	542	(C)
Freezing Range	71	(C)
Latent Heat of Fusion	388175,063	(J/kg)

Fill Time 10 Seconds

OK

FINITE SOLUTIONS, 2007

Adicionalmente se debe introducir el tiempo de llenado del molde, el cual se puede aproximar inicialmente mediante un cálculo manual pero que luego se ha de identificar con más exactitud dentro de los resultados obtenidos. Dicho cálculo inicial se hace con la información de volumen de la pieza y el área transversal de

entrada de los canales de alimentación dada por el programa de modelación *SolidWorks*. La velocidad de llenado de entre 2,5 y 5 m/s es mencionada en el numeral 7.3.1 de este documento.

Para el diseño original de canales:

Velocidad del flujo = $v = 250 \text{ mm/s}$

Volumen de la pieza + canales = $V = 652303.23 \text{ mm}^3$

Área transversal de los canales de entrada = $A = 210.58 \text{ mm}^2 * 2 = 421.15 \text{ mm}^2$

Caudal = $Q = v * A = 105287.5 \text{ mm}^3/\text{s}$

Tiempo de llenado = $t = V/Q = 6.19 \text{ seg}$

Para la propuesta alternativa de diseño de los canales:

Velocidad del flujo = $v = 250 \text{ mm/s}$

Volumen de la pieza + canales = $V = 622769.40 \text{ mm}^3$

Área transversal de los canales de entrada = $A = 185.98 \text{ mm}^2 * 2 = 371.96 \text{ mm}^2$

Caudal = $Q = v * A = 92990 \text{ mm}^3/\text{s}$

Tiempo de llenado = $t = V/Q = 6.697 \text{ seg}$

Sin embargo para garantizar que se dé el llenado del molde en la simulación, al software se le introduce un tiempo de llenado de 10 segundos que no afecta los resultados.

- Se debe introducir la información del material en el que está fabricado el molde, su temperatura inicial y conductividad térmica, debido a que son algunas de las variables principales con las que el software hace los cálculos térmicos. La temperatura inicial del molde se considera de 500°C que es una temperatura típica conocida por mediciones anteriormente tomadas en la planta a otros moldes, mientras que la conductividad térmica para el acero O1 es de 24,3W/mK según la

tabla 2 de éste documento. En la imagen se puede ver además que se debe introducir la temperatura ambiente, la cual se ha determinado que es de aproximadamente 50°C mediante mediciones en la planta.

Ilustración 51. Información del material del molde.

Materials List

☐ Casting
 ☒ **Mold**
☐ Curves
 ☐ HT Coefficients

Ambient Temperature: 50 (C)

Materials in Database:

- Air
- Cast Iron
- Chromite Snd
- Copper Chill
- Exo Sleeve

>> Remove from DB ^^
 Add to list >>
 ^^ Remove from List <<

Materials in List:

- Steel

^^ Add to DB ^^

^^ Add to List ^^

Name: Air Type: Normal Mold Initial Temp: 26,667 (C)
 Thrm Cond: 0,035 (W/m-K) SpC Ht: 1004,16 (J/kg-K) Dens: 0,961 (kg/m^3)

OK

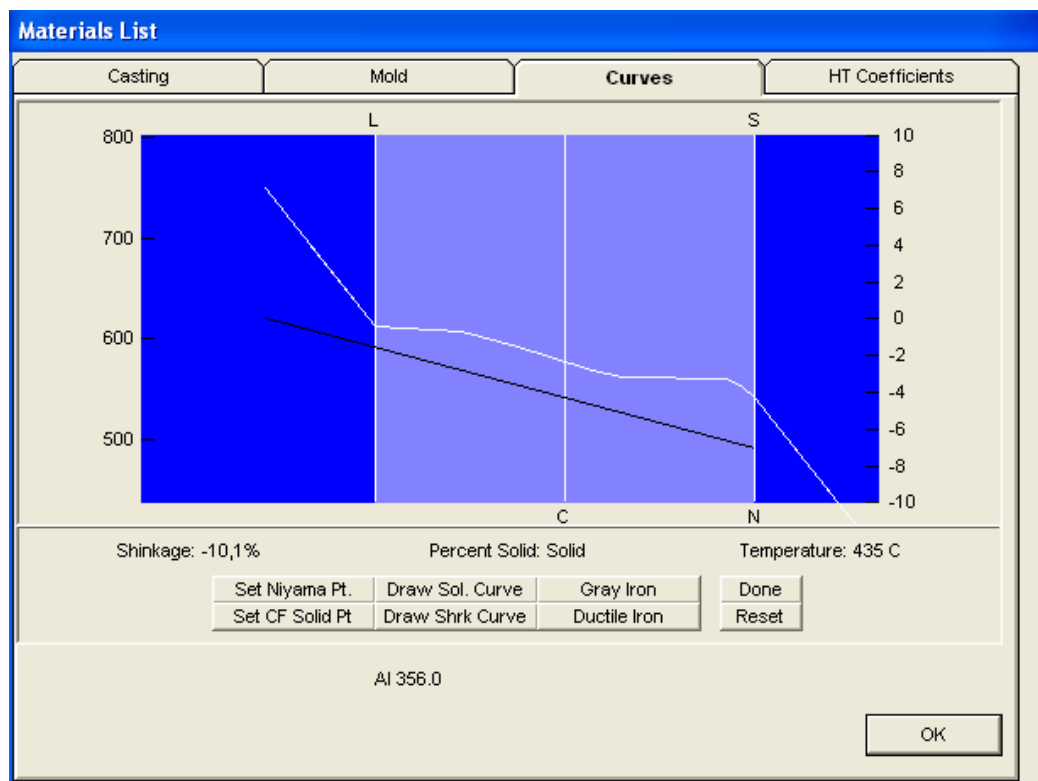
FINITE SOLUTIONS, 2007

- Al correr las simulaciones el software debe iterar sus formulas con base en el comportamiento de los materiales involucrados, para tal fin se debe introducir las curvas de comportamiento tanto del material fundido como del material del molde. Los programas especializados como *SolidCast* muchas veces traen incluida toda la información, pero en el caso de un material que no se encuentre en la base de datos, se debe introducir la información manualmente.

Para desarrollar el proceso el software usa principalmente la información de la grafica que se muestra en la imagen a continuación, donde la línea blanca muestra la curva de enfriamiento (porcentaje solido Vs temperatura) del aluminio, la temperatura se lee en la escala de la izquierda. La línea negra se refiere al cambio volumétrico dado en porcentaje, se lee en la escala de la derecha.

Se puede observar también que el grafico se divide en tres segmentos. El segmento azul de la izquierda se refiere al estado líquido del aluminio. El segmento más claro del centro es la transición entre líquido y solido. Mientras que el azul de la derecha muestra el estado sólido del material.

Ilustración 52. Grafico de porcentaje solido Vs temperatura y cambio volumétrico.

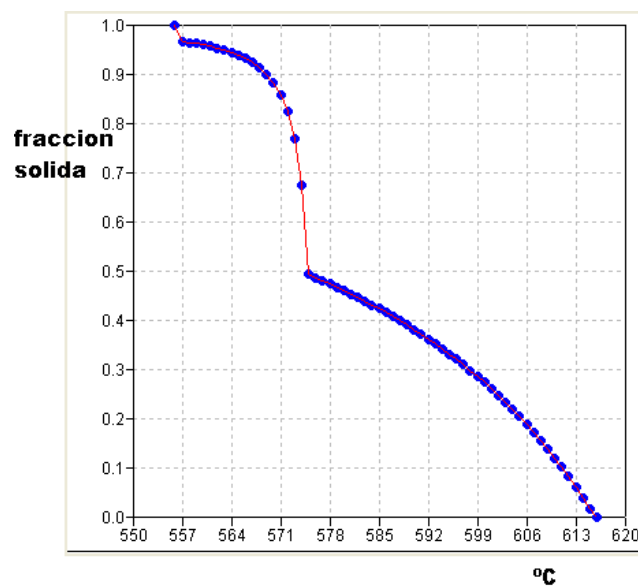


FINITE SOLUTIONS, 2007

Para evaluar el comportamiento de la pieza al ser llenada, el programa requiere de información que satisfaga las variables que éste utiliza para iterar las formulas.

La graficas de fracción solida Vs temperatura permite al programa saber qué porcentaje del material se encuentra en estado sólido a la vez que la temperatura va cambiando.

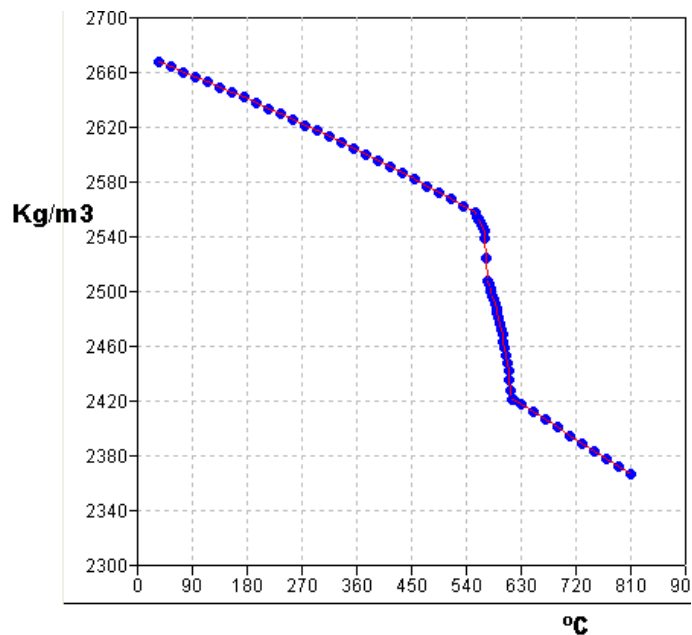
Ilustración 53. Fracción solida Vs viscosidad del aluminio.



ESI GROUP, 2005

Al cambiar la temperatura del aluminio varía también su densidad. Conocer los valores de densidad Vs temperatura del aluminio al llenarse el molde es fundamental, ya que estos en un momento dado permiten determinar la generación de defectos en la pieza.

Ilustración 54. Grafico de Densidad Vs temperatura del aluminio.



ESI GROUP, 2005

Con la información que suministra la grafica de viscosidad Vs temperatura que para el caso es un modelo de flujo newtoniano, el programa puede predecir el comportamiento de las capas de material en estado líquido entre sí y del aluminio en contacto con el molde.

El tipo de flujo se puede dividir en dos movimientos, uno laminar o lento y otro turbulento. En el llenado del molde se dan los dos tipos de flujo y los dos son considerados por el software.

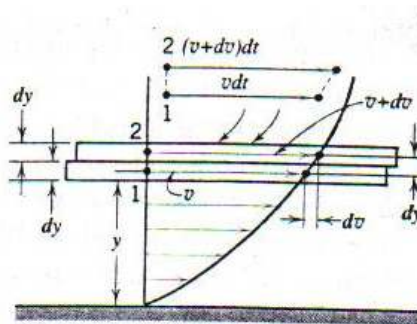
Para definir la viscosidad se debe considerar un perfil de velocidades, en el cual las partículas que están en contacto con las paredes tienen velocidad igual a cero, y dicha velocidad va aumentando a medida que se va alejando de las paredes, determinando un movimiento relativo entre las capas adyacentes del fluido en movimiento. La distancia entre dos partículas ubicadas entre capas adyacentes del fluido se denomina dy mientras que la diferencia entre las velocidades de estas

dos partículas se denomina dv como se observa en la ilustración 58 (STREET, 1996).

La fuerza de ficción que existe entre las capas adyacentes del fluido se conoce como esfuerzo cortante y se designa con el símbolo T . La viscosidad dinámica o coeficiente viscoso para un flujo laminar se designa con μ . Para calcular dicho coeficiente viscoso se utiliza la formula $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$ (STREET, 1996).

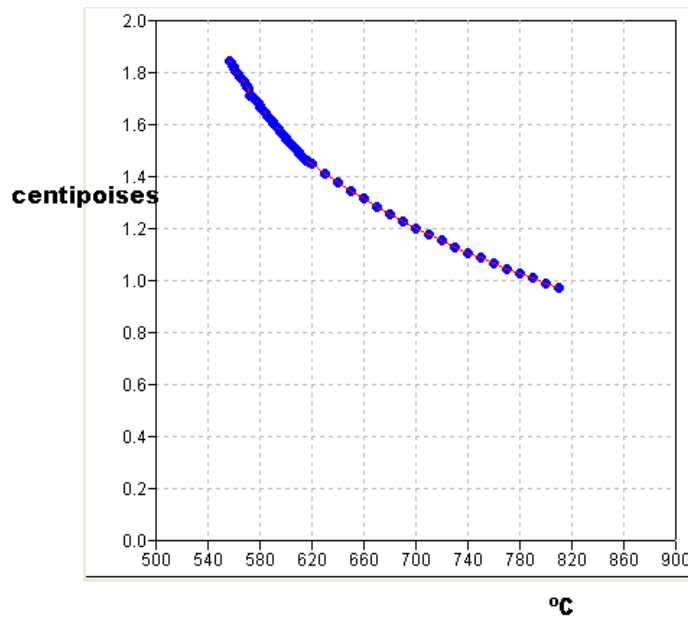
Todo fluido posee viscosidad y por tanto exhibe cierto fenómeno de fricción cuando se encuentra en movimiento. La viscosidad resulta fundamentalmente de la cohesión y el cambio de momentum molecular entre capas de fluido, y cuando existe un flujo, este efecto se muestra como un esfuerzo tangencial entre las capas que están en movimiento (STREET, 1996).

Ilustración 55. Movimiento laminar de un fluido por un canal solido.



STREET, 1996.

Ilustración 56. Viscosidad Vs temperatura, modelo newtoniano.



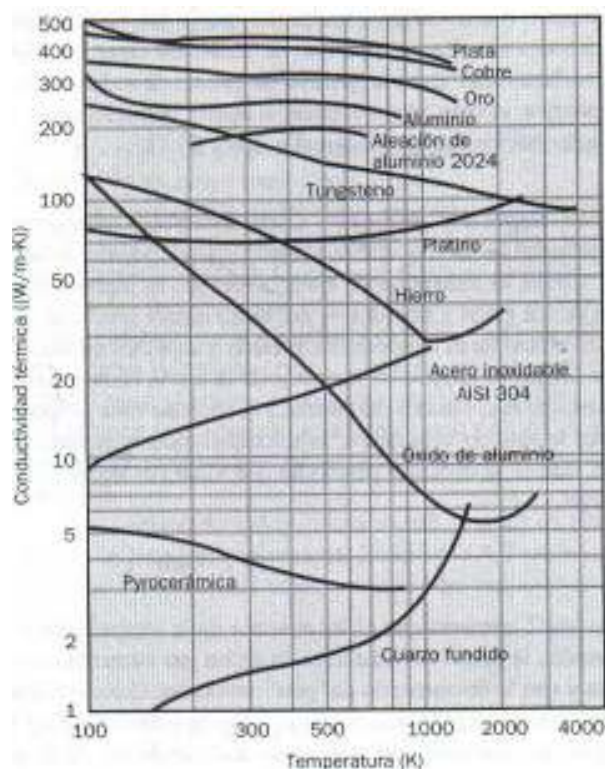
ESI GROUP, 2005

Para poder identificar como se da el comportamiento térmico del aluminio al interior del molde, se debe introducir la información que muestre tanto del aluminio como del molde los valores de conductividad térmica Vs temperatura.

La conductividad térmica es una medida de la capacidad del material para conducir calor (Çengel, 2003). En la visión moderna de los materiales, un sólido se compone de electrones libres y de átomos unidos en un arreglo periódico denominado estructura cristalina. Por consiguiente, el transporte de energía térmica se debe a dos efectos: la migración de electrones libres y las ondas vibracionales de la estructura cristalina. Estos efectos son aditivos, de modo que la conductividad térmica k es la suma del componente electrónico k_e y el componente de la estructura cristalina k_l . Por tanto $k = k_e + k_l$ (INCROPERA, 1996).

Como se observa en la siguiente grafica logarítmica, la conductividad térmica del aluminio es una de las más altas dentro de los sólidos, mientras que la del acero se incrementa casi linealmente al incrementarse la temperatura.

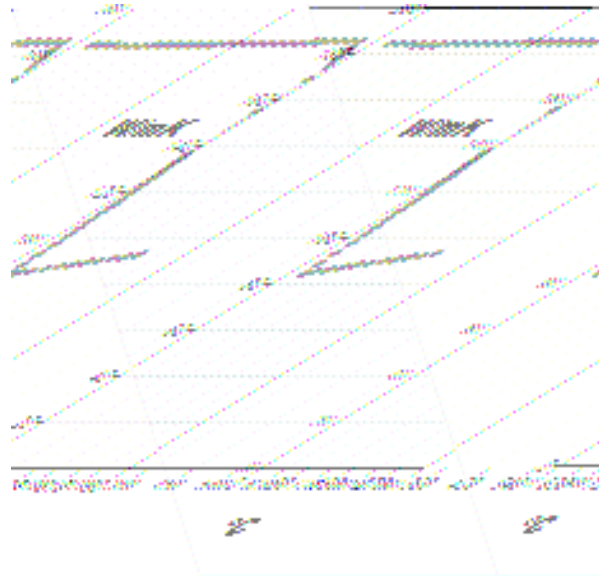
Ilustración 57. Dependencia de la conductividad térmica respecto a la temperatura de sólidos seleccionados.



INCROPERA, 1996

En la siguiente ilustración se muestra la conductividad térmica del aluminio Vs la temperatura. Nótese que mientras se encuentra en estado sólido la conductividad es casi invariable.

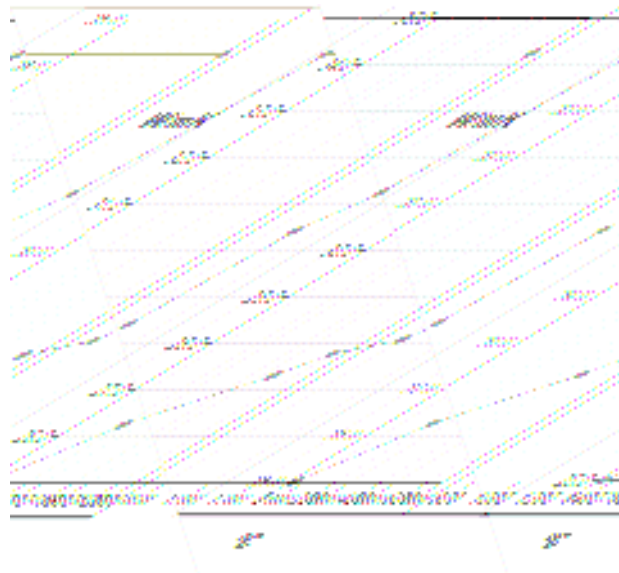
Ilustración 58. Conductividad térmica Vs viscosidad del aluminio.



ESI GROUP, 2005

Al aumentar la temperatura, se puede observar en la ilustración como aumenta la conductividad térmica para el acero O1.

Ilustración 59. Conductividad térmica Vs temperatura del acero O1.



ESI GROUP, 2005

- Dentro de la parametrización que se debe hacer antes de correr la simulación se deben asignar los coeficientes de transferencia de calor que hay entre los materiales involucrados. De adentro hacia afuera, el coeficiente entre la aleación de aluminio y el acero O1 del molde es de $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$. (ESI GROUP, 2005). El coeficiente que hay entre la superficie exterior del molde y el ambiente debe estar entre 35 y $45 \text{ W/m}^2\text{K}$ por lo que se define como de $40 \text{ W/m}^2\text{K}$ (FINITE SOLUTIONS, 2007).

Ilustración 60. Información de coeficientes de transferencia de calor.

The screenshot shows a software window titled "Materials List" with four tabs: "Casting", "Mold", "Curves", and "HT Coefficients". The "HT Coefficients" tab is selected. Inside this tab, there is a checkbox labeled "Use Internal HT Coefficients" which is checked. To the right of this checkbox is a text field for "External HT Coefficient" with the value "8,512" and units "(W/m^2-K)". Below these, there are two lists of materials. The left list contains: "1: Casting Material", "2: Riser Material", "3: Ambient", and "4: Steel". The right list contains: "3: Ambient" and "4: Steel". A text field with the value "1000" and units "(W/m^2-K)" is positioned between the two lists. An "OK" button is located at the bottom right of the dialog box.

FINITE SOLUTIONS, 2007

10.1.2. GENERACION Y MALLADO DEL MODELO DE ESTUDIO

Luego de introducir toda la información requerida por el programa para hacer la simulación, se debe cargar la geometría. Cada programa de este tipo maneja metodologías distintas para realizar el proceso, pero para el caso de *SolidCast* y

FlowCast, la geometría solo puede ser cargada como un archivo con extensión *.STL binario, por lo que ésta debe ser guardada con dicha extensión desde *SolidWorks* para que pueda ser leída. Al tener cargada la geometría, se debe indicar al programa los puntos por donde se da la entrada del material y si se desea éste permite mediante figuras geométricas primitivas crear elementos adicionales como canales de refrigeración, vertederos, etc.

Luego de tener definida la geometría que representa la parte a llenar con el aluminio se procede a generar el mallado de la pieza. Existen muchos tipos de mallas con diferentes utilidades y características, mallas con elementos tetraédricos, hexaédricos, etc. El *SolidCast* genera un mallado cartesiano. Es decir, convierte la geometría en un conjunto de cubos apilados, similar a un *Lego*.

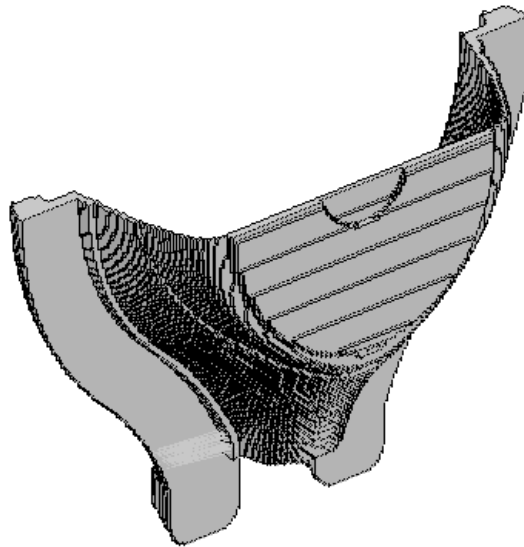
Al utilizar la opción de mallado, el programa pregunta los valores de las dimensiones del molde para generarlo automáticamente sobre la pieza.

El mallado es necesario debido a que el programa itera entre los elementos de la malla las formulas con la información ingresada por el usuario para obtener la información resultante requerida.

Se debe escoger el nivel de refinamiento de la malla, seleccionando la cantidad de elementos o cubos a generar, o el tamaño de cada uno de estos. Entre más pequeños sean los cubos, o entre más cantidad de estos haya, mayor será el refinamiento de la malla y por tanto más exactos serán los resultados. Sin embargo, entre más refinada sea la malla, requerirá un mejor computador y mayor tiempo para procesar la información. Para este proyecto se trabaja con un tamaño de elemento de 1,2mm que es el máximo tamaño con el que la memoria del computador utilizado es capaz de trabajar.

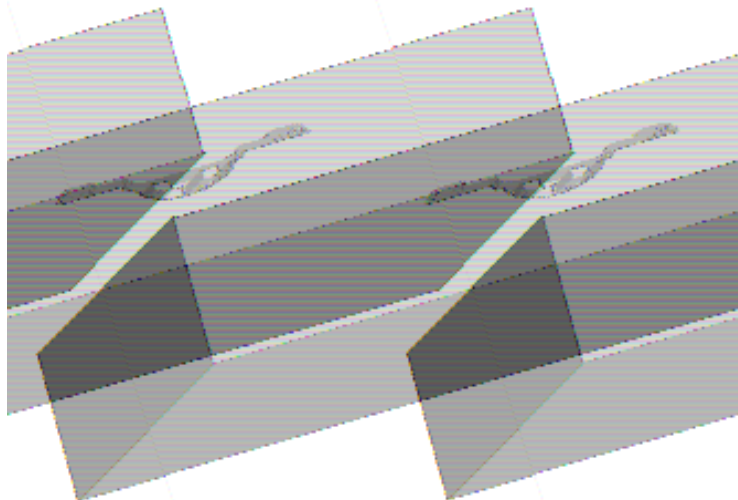
Al correr el mallado el programa genera primero la malla de la geometría a llenar con el aluminio como se muestra en la ilustración 64, y posteriormente la del molde creando la cavidad hueca de llenado como se observa en la ilustración 65.

Ilustración 61. Proceso de generación de la malla de la cavidad.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 62. Proceso de mallado del molde.



CARRIZOSA, 2007

10.1.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION

Luego de haber ingresado la información requerida y de haber generado el mallado, se procede a correr las simulaciones tanto para *SolidCast* como para *FlowCast*.

- *SolidCast* es un software que utiliza el método de diferencias finitas (FDM¹⁰) para hacer los cálculos de transferencia de calor, combinado con un seguimiento de los cambios volumétricos en el metal, para predecir las variaciones de temperatura y volumen en el material al ser vaciado, solidificado y enfriado (FINITE SOLUTIONS, 2007).

El Método de diferencias finitas consiste en una aproximación de derivadas parciales por expresiones algebraicas envolviendo los valores de la variable dependiente en un limitado número de puntos seleccionados.

Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que describe el problema es reemplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas, escritas en términos de los valores de la variable dependiente en puntos seleccionados. Las ecuaciones son lineales si las ecuaciones diferenciales parciales son también lineales.

El valor de los puntos seleccionados se convierte en las incógnitas, en vez de la distribución espacial continua de la variable dependiente. El sistema de ecuaciones algebraicas debe ser resuelto y puede envolver un número largo de operaciones aritméticas (MMC, 2007).

¹⁰ FDM: Siglas para finite difference method.

Lo que se logra con éste método es que el programa itere entre los elementos de la malla las formulas necesarias para hacer que converjan los resultados. Con esto se puede obtener información como temperaturas, densidad del material en todos los puntos de la pieza, tiempo de solidificación y algunos otros elementos importantes para evaluar la calidad del diseño de la pieza y poder tomar decisiones al respecto.

- *FlowCast* es un software que utiliza el método de dinámica de fluidos computacional (CFD¹¹) para calcular la solución numérica a la ecuación de *Navier-Stokes* que es la que gobierna el comportamiento del flujo en los fluidos (FINITE SOLUTIONS 2006).

La ecuación de *Navier-Stokes* describe el movimiento de los fluidos tanto líquidos como gaseosos. Esta ecuación establece que los cambios en el momentum para volúmenes infinitesimales del fluido son simplemente la suma de las fuerzas viscosas de disipación (similar a la fuerza de fricción), los cambios en la presión, gravedad y otras fuerzas actuando dentro del fluido, como una aplicación de la segunda ley de Newton (POLYANIN, 2002).

La mayoría de las aplicaciones de las ecuaciones de *Navier-Stokes* se han desarrollado asumiendo un flujo incompresible para fluidos newtonianos. La asunción de flujo incompresible generalmente obtiene buenos resultados incluso trabajando con fluidos compresibles. Teniendo en cuenta que es para un fluido incompresible y asumiendo que la viscosidad es constante, la ecuación de *Navier-Stokes* se puede leer en forma vectorial de la siguiente forma (POLYANIN, 2002):

¹¹ CFD: Siglas par Computational fluid dynamics.

Ilustración 63. Ecuación de Navier-Stokes para fluidos incompresibles.

$$\rho \left(\underbrace{\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}}_{\text{aceleracion inestable}} + \underbrace{(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}}_{\text{Aceleracion convectiva}} \right) = \underbrace{-\nabla p}_{\text{Gradiente de presión}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{v}}_{\text{Viscosidad}} + \underbrace{\mathbf{f}}_{\text{Otras fuerzas}}$$

POLYANIN, 2002

Flowcast permite simular el comportamiento del flujo, mostrando el comportamiento transiente del material, entregando información sobre la temperatura, velocidad y presión durante el llenado.

10.2. RESULTADOS DE LA SIMULACION

Con base en los resultados obtenidos en las simulaciones tanto de *SolidCast* como de *FlowCast*, se realiza el análisis para las dos propuestas de diseño de canales de alimentación.

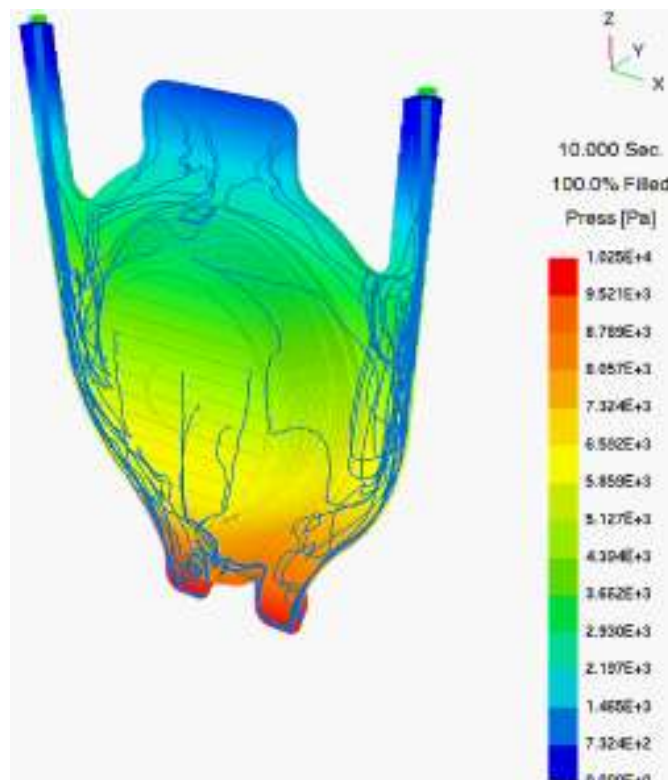
10.2.1. ANALISIS DE RESULTADOS PARA LA PROPUESTA ORIGINAL DE CANALES DE ALIMENTACION

Lo primero que se obtiene al correr la simulación es el comportamiento transiente del flujo calculado por el CFD FlowCast y en el que se puede ver las distribuciones de temperatura, velocidad y presión durante el llenado. En los archivos anexos se puede ver los videos correspondientes al flujo de llenado de las dos propuestas de diseño de canales, mostrando el comportamiento de la presión, la velocidad y la temperatura.

- Para el caso del diseño original de canales se puede ver que el comportamiento del flujo es el deseado, llegando primero hasta el fondo del molde a los pozos

diseñados para evitar los efectos negativos que pudiesen producirse al darse las turbulencias que se generan cuando choca el frente de flujo con el fondo del canal. Este comportamiento puede ser observado por medio del movimiento de las partículas del material ilustrado como una línea azul clara en la siguiente imagen, que también sirve para ilustrar la distribución de presiones al finalizar el llenado del molde.

Ilustración 64. Distribución de presiones al interior del molde y líneas de comportamiento de las partículas en el llenado.

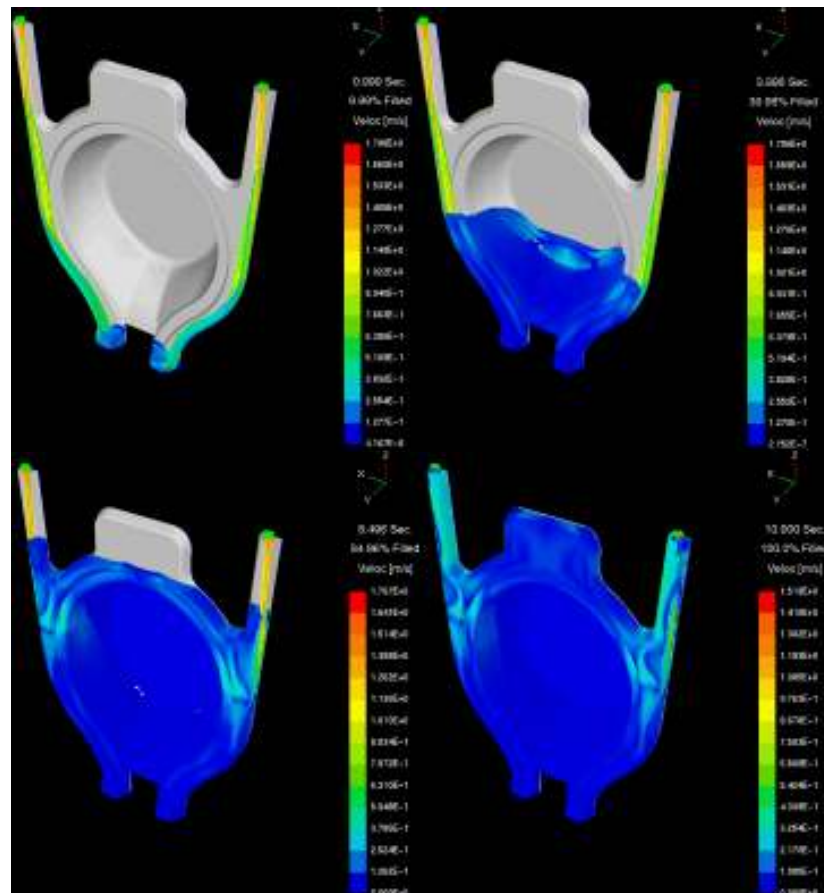


CARRIZOSA, 2007

- Dado que el llenado es ascendente y el material se va acumulando al llegar al fondo, la distribución de presión es uniforme y se identifica claramente que la mayor presión se encuentra en el fondo y va disminuyendo hasta llegar a cero en la parte más alta por donde está la entrada de material.

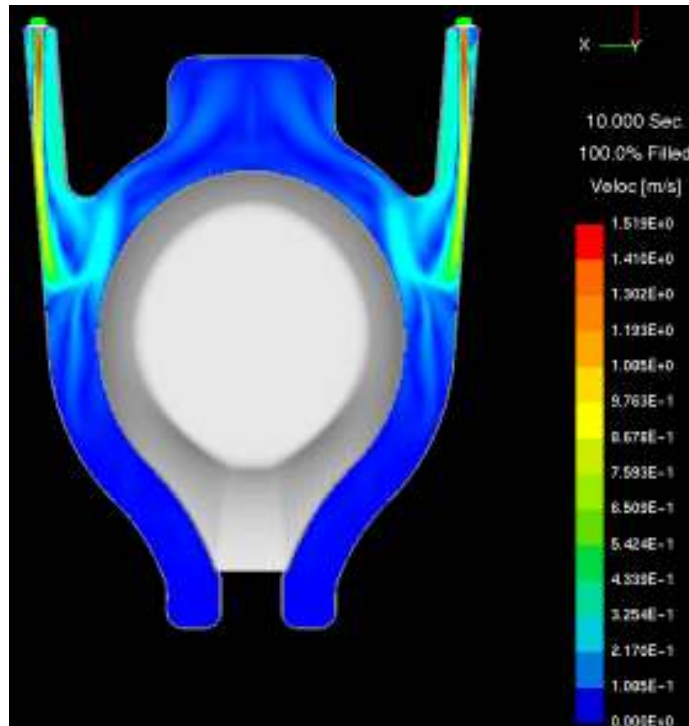
- En la siguiente progresión de imágenes se ve el flujo de material que llena el molde, los colores muestran las velocidades en los momentos específicos del llenado. Se evidencia que las mayores velocidades siempre están dentro del canal de alimentación, ya que por estos es por donde el flujo corre inicialmente, el rojo representa la mayor velocidad y esta se puede ver en la ilustración 69, en la cual se hace un corte del canal de alimentación mientras se presenta el flujo de llenado. La parte central del flujo es la que mayor velocidad posee ya que es la que más lejos se encuentra de las paredes del canal.

Ilustración 65. Progresión de velocidades durante el llenado.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 66. Corte en sección del canal mostrando velocidades.



CARRIZOSA, 2007

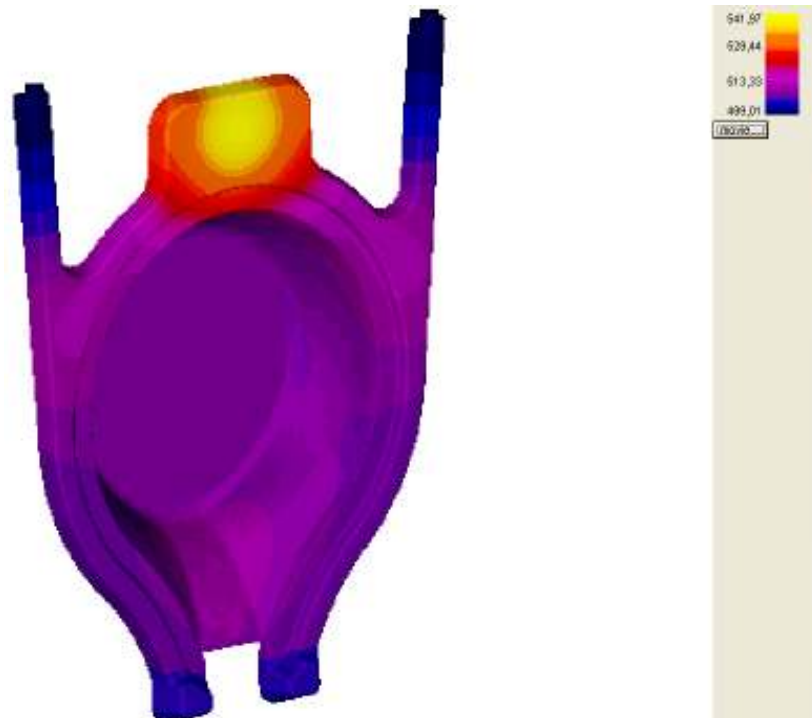
Otro aspecto fundamental para el diseño y que se puede observar en la simulación es que la máxima temperatura siempre se encuentra en los canales y no en la pieza.

- En la secuencia de la ilustración 71, se muestra el flujo de llenado del molde, evidenciando el comportamiento de la temperatura a medida que este va transcurriendo. Nótese que la temperatura más alta, representada con color amarillo siempre está presente en los canales de alimentación más no en la pieza, esto es bueno, ya que se evita que queden remanentes de calor o puntos calientes dentro de la pieza, que favorezcan la aparición de macro porosidades (rechupes).

Por otra parte, obteniendo los resultados por el método de diferencias finitas utilizado por *SolidCast*, se pueden ver datos distintos a los que muestra el CFD *Flowcast*, ya que con este se predicen los comportamientos en la solidificación, como se muestra a continuación.

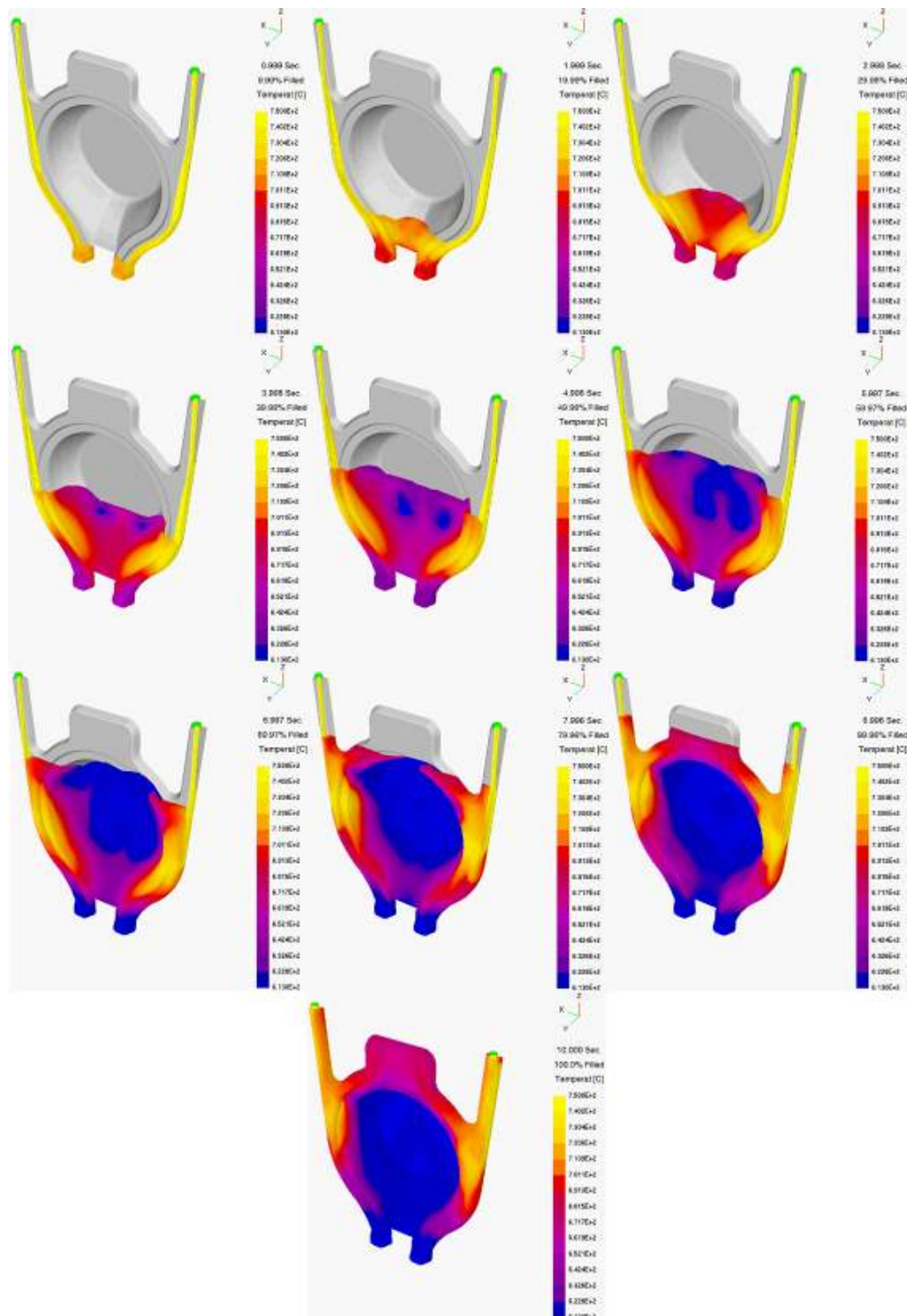
- En la ilustración 70 se pueden observar las temperaturas de la pieza en el punto en que el aluminio logra la completa solidificación. Como se ve en la mayoría de los diseños de este tipo, el último punto en solidificarse es la parte del canal que se encuentra sobre la pieza y generalmente es la que mayor cantidad de macro porosidades presenta. Cabe anotar que justo por esta parte es donde se ubica la salida principal de gases del molde, y como las salidas de gases no se han considerado dentro de la simulación, se puede identificar un incremento de la temperatura anormal en esta zona.

Ilustración 67. Temperaturas en la pieza justo al terminar la solidificación.



CARRIZOSA, 2007

Ilustración 68. Secuencia de llenado con comportamiento de la temperatura.

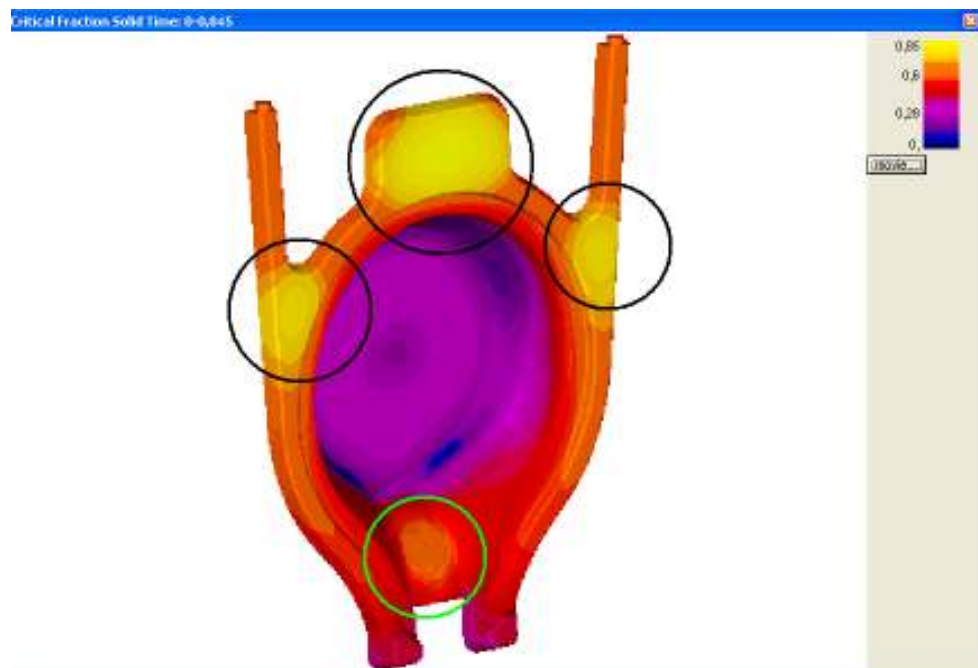


CARRIZOSA, 2007

- Otro resultado que arroja la simulación es la fracción sólida crítica, con la que se puede ver la solidificación progresiva del material. Para este caso, la solidificación se da desde el centro de la pieza hacia los canales. Se puede ver un sitio donde podría quedar un punto caliente hacia la parte inferior central de la pieza encerrado en la imagen por un círculo verde, pero no es tan crítico ya que para que sea inminente la presencia de defectos se debe observar color amarillo, como los tres puntos encerrados en círculos negros, donde normalmente deben ir salidas de gases.

Los puntos calientes normalmente tienden a resultar en macro porosidades, pero en este caso al estar ubicados en los canales y teniendo en cuenta que hacen falta las salidas de gases, no afectan la calidad de la pieza.

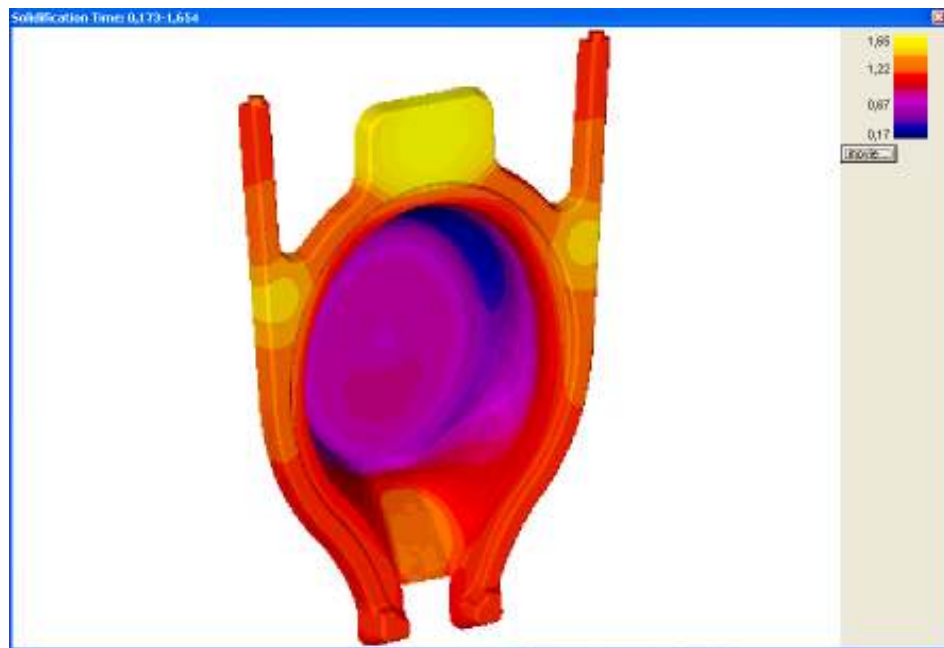
Ilustración 69. Imagen que indica la solidificación progresiva del aluminio.



CARRIZOSA, 2007

- El tiempo de solidificación para la pieza también es calculado y es de 1,65 minutos o 1 minuto 39 segundos para que la pieza se encuentre completamente solida. En la grafica se pueden ver representados con color amarillo los últimos puntos que se solidifican.

Ilustración 70. Tiempo de solidificación de la pieza.



CARRIZOSA, 2007

- Es posible ver cómo quedan distribuidas las propiedades del material. Para el caso se puede observar en la ilustración que toda la pieza tiene propiedades uniformes.

Ilustración 71. Distribución de las propiedades del material.

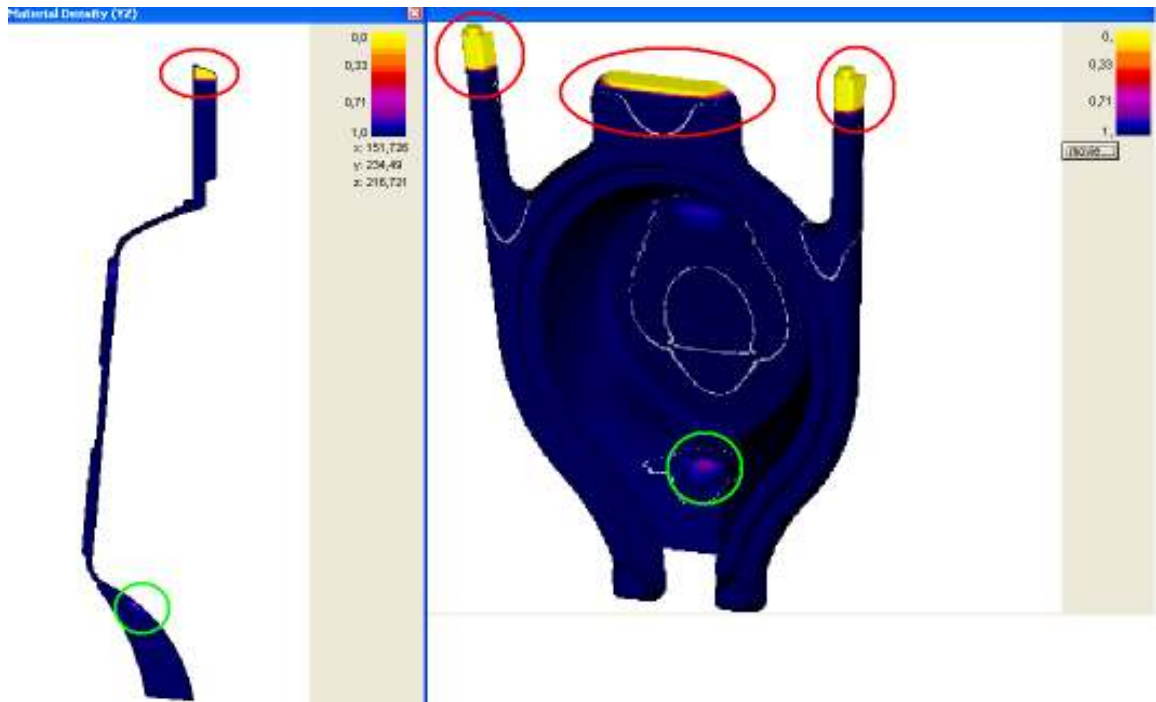


CARRIZOSA, 2007

- Se pueden identificar claramente los puntos donde se presentan las macro porosidades o rechupes, ya que el software calcula la densidad para cada parte de la pieza. En este caso (ilustración 75) se puede ver encerrado en un círculo verde un punto donde hay una leve tendencia a generarse defectos en la pieza, en este punto podrían presentarse micro porosidades por acción de la acumulación de calor, pero no es nada comparado con los puntos encerrados en amarillo, donde es evidente que se han de generar macro porosidades.

Para las entradas de material es muy normal, ya que están abiertamente en contacto con el aire por lo que es un fenómeno conocido el que se generen dichos rechupes. En cuanto a la parte superior central de los canales, es de esperarse ver que se generaran macro porosidades, debido a que en la simulación no están incluidas las salidas de gases, e inclusive con la salida de gases, es una zona que tiene una fuerte tendencia a generar este tipo de defectos. Esto no es para nada preocupante porque de cierta forma para eso es que está diseñada esa parte del canal.

Ilustración 72. Densidades del aluminio al finalizar la solidificación.

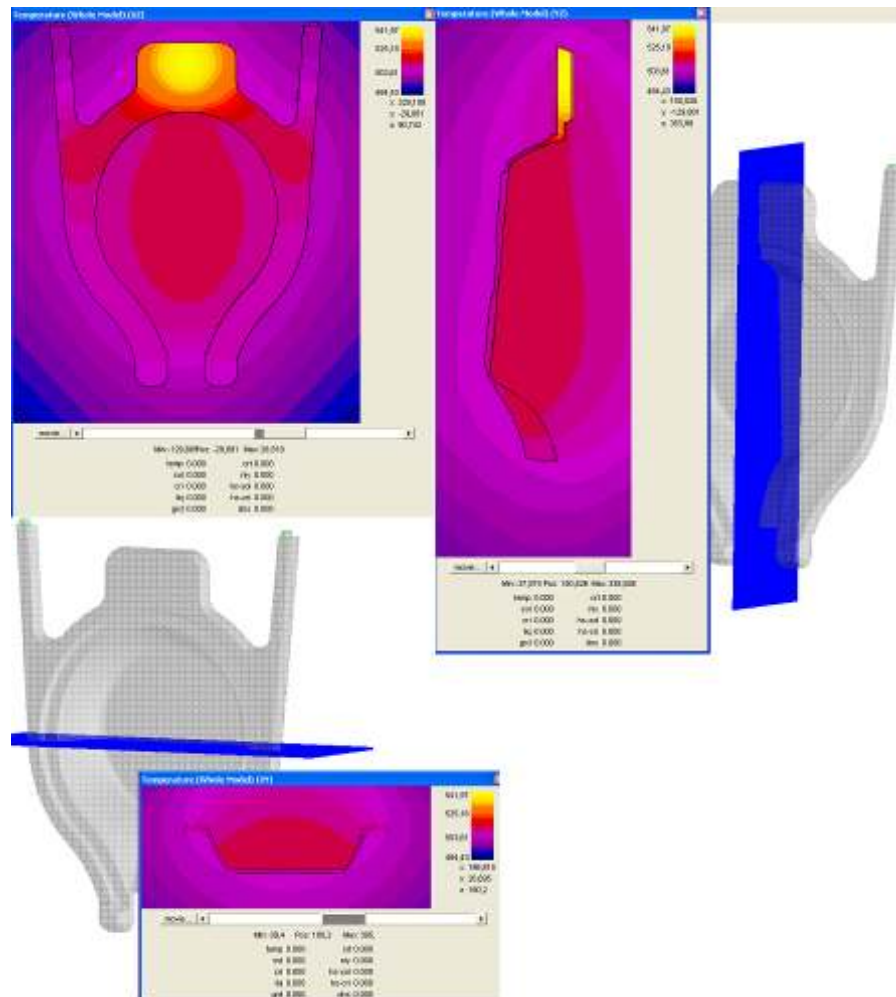


CARRIZOSA, 2007

- Con la simulación es posible ver el comportamiento térmico del molde, fundamentalmente para poder evaluar donde se concentra el calor y con esto tomar medidas correctivas como reducción de espesores en toda la pieza o sitios localizados. Para este caso, se hizo una serie de cortes en tres planos distintos para observar cómo se comporta la temperatura a través del molde.

Lo que se puede observar de las imágenes es que hay una concentración de la temperatura en el macho del molde. Aunque en la modelación ya se encuentra una reducción en la parte posterior del macho, para la simulación el molde no cuenta con dicha reducción. Esto demuestra que reducir material de la parte posterior del macho es importante para favorecer una solidificación uniforme y evitar puntos calientes dentro del molde.

Ilustración 73. Corte central del molde en xy, xz y yz.



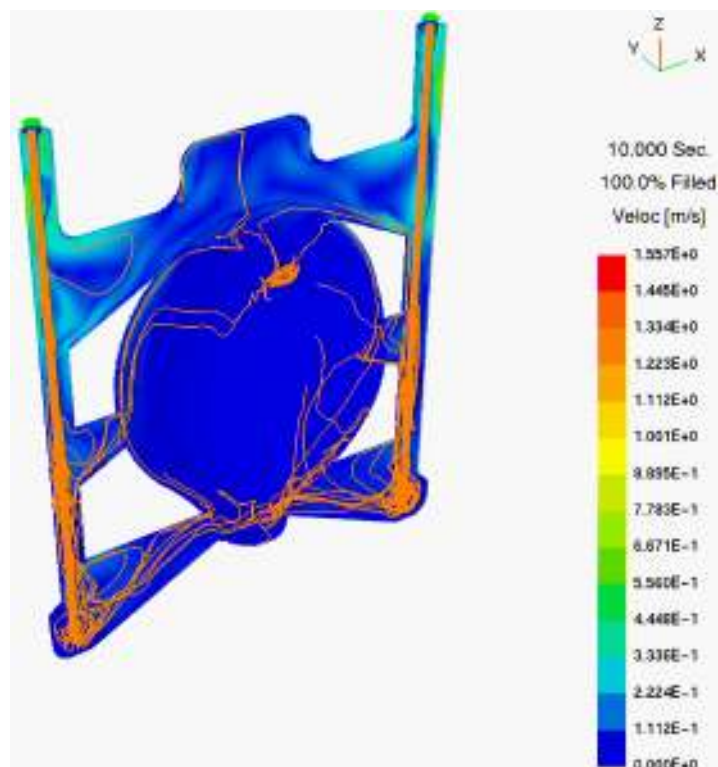
CARRIZOSA, 2007

10.2.2. ANALISIS DE RESULTADOS PARA LA PROPUESTA ALTERNATIVA DE CANALES DE ALIMENTACION

Para la segunda propuesta de canales de alimentación, se ha buscado que los canales dirijan el flujo verticalmente y en línea recta hacia los pozos en el fondo del molde. Por otro lado las puertas de entrada del material hacia la pieza ya no están por todo el canal sino que se encuentran en posiciones específicas.

- Cuando se observan los resultados del llenado con el comportamiento de las líneas de flujo, que en la siguiente ilustración de velocidades se pueden ver en color naranja, se encuentra que el fluido se direcciona muy bien, en especial en el momento más crítico, que es cuando cae verticalmente y el frente de flujo llega a los pozos y se producen las vorticidades (turbulencia) que podrían perjudicar la calidad de la pieza.

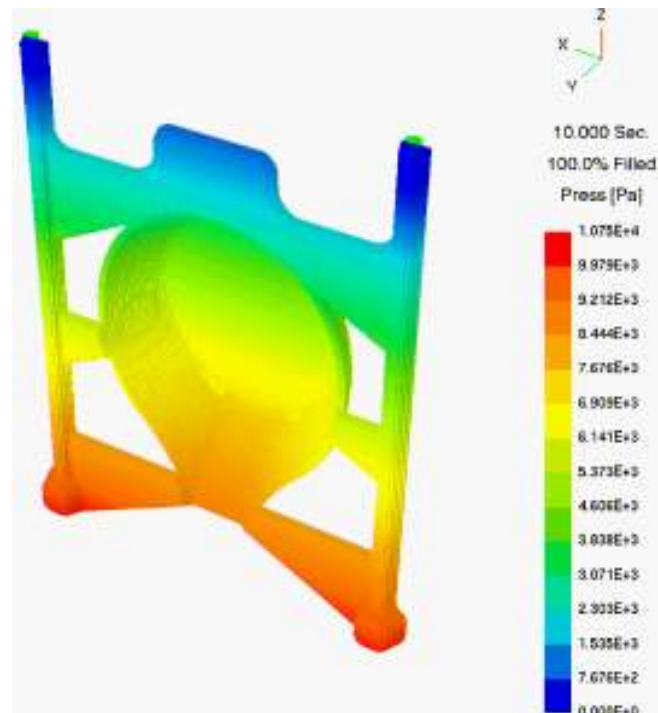
Ilustración 74. Velocidades al terminar el llenado del molde y líneas de comportamiento del flujo.



CARRIZOSA, 2007

- Al igual que en el primer diseño de canales, en este caso la distribución de presiones es ascendente, siendo mayor en el fondo y relativamente cero en la entrada de material.

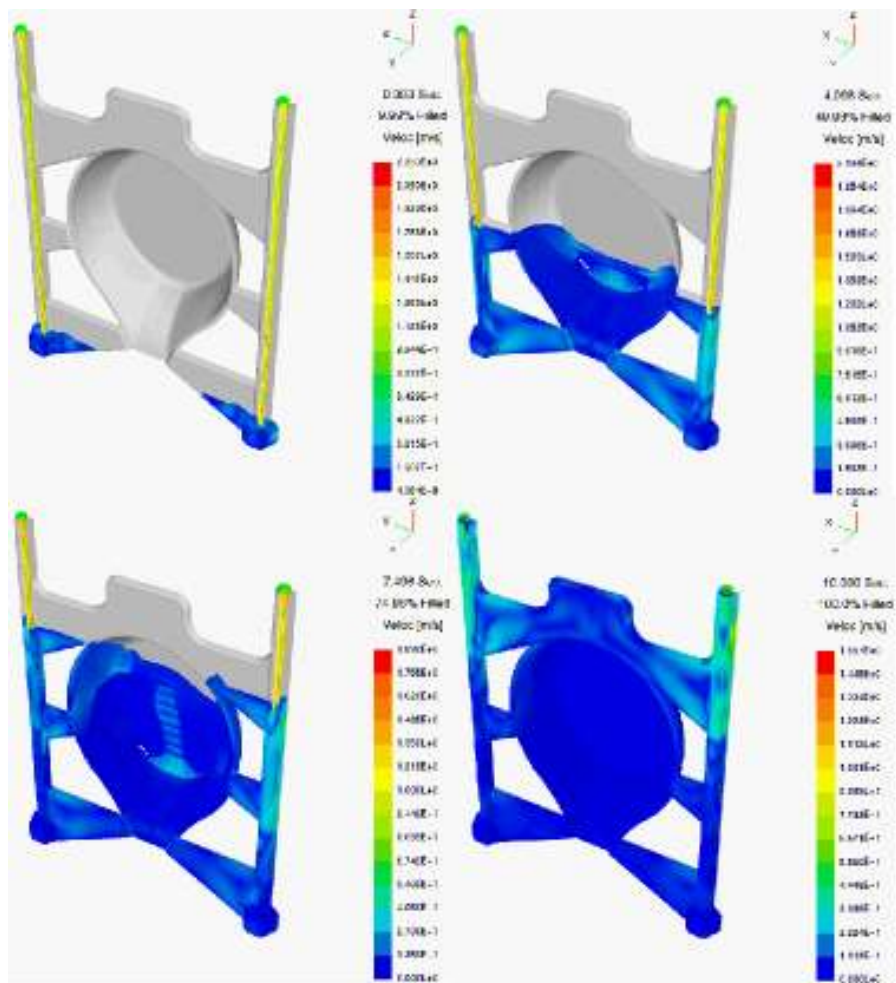
Ilustración 75. Representación grafica de las presiones en el diseño alternativo.



CARRIZOSA, 2007

- En la siguiente ilustración se puede ver la progresión de llenado del molde y las velocidades que se presentan en cada instante del llenado, representadas por medio de colores. Siempre las mayores velocidades se dan en los canales de alimentación debido a que al caer el material por gravedad, se da una mayor velocidad en el flujo de ese instante.

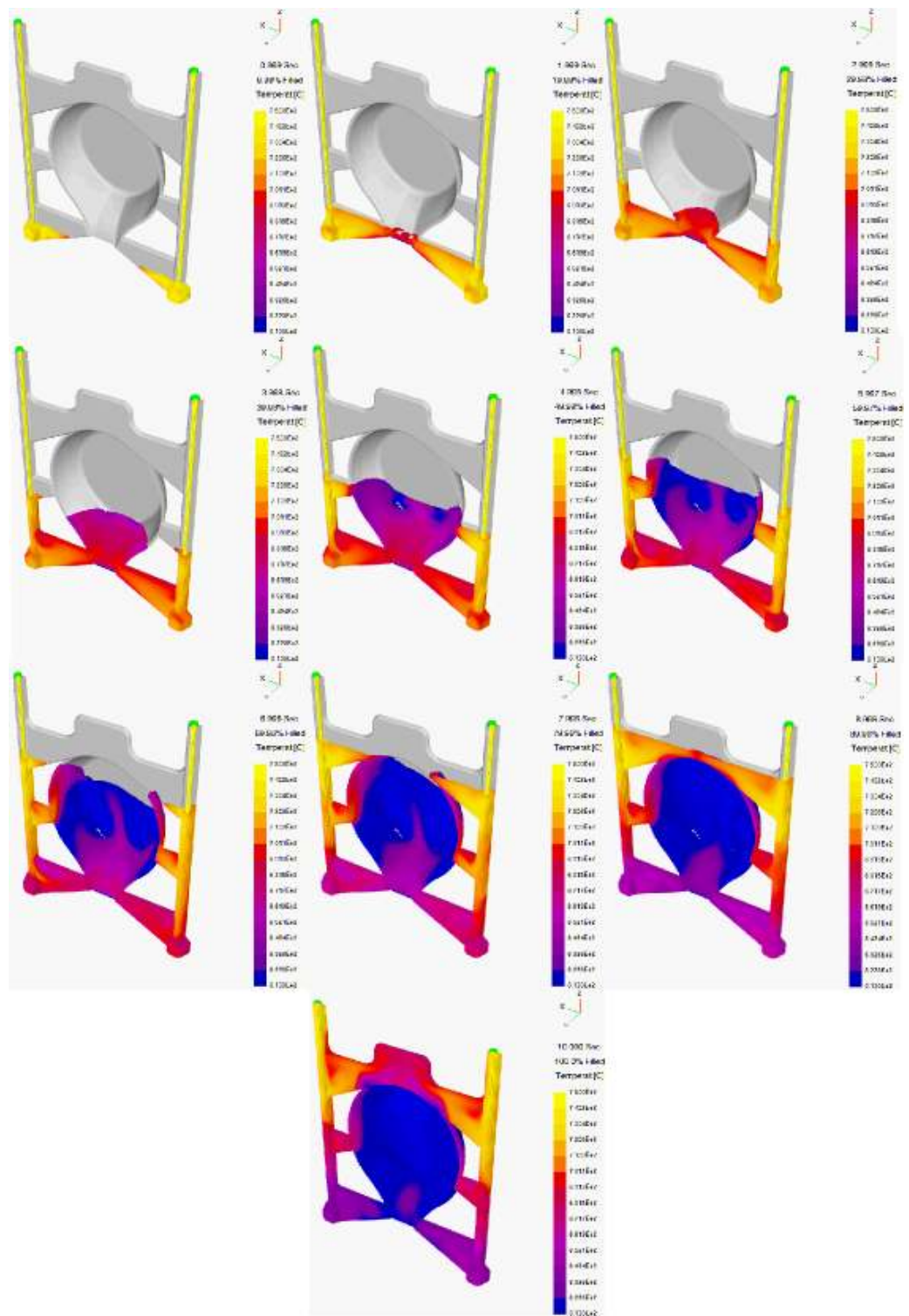
Ilustración 76. Progresión de velocidades en el flujo de llenado.



CARRIZOSA, 2007

- En la progresión de temperaturas durante el llenado que se muestra en la imagen a continuación se puede ver cómo la temperatura del fluido fluye principalmente por los canales, pero a diferencia del modelo de canales propuesto inicialmente, en este diseño la alta temperatura fluye también por las dos puertas inferiores, lo que no es bueno porque puede llegar a producir acumulaciones excesivas de temperatura en la parte inferior de la pieza.

Ilustración 77. Secuencia de llenado con comportamiento de las temperaturas.

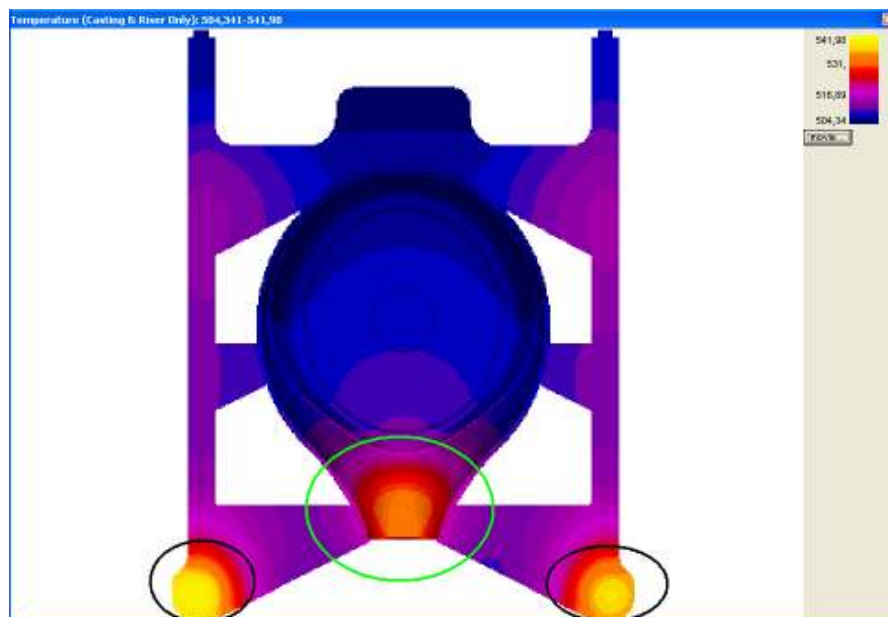


CARRIZOSA, 2007

- Para el análisis de solidificación, en la grafica de temperatura para el instante en el que termina de solidificarse el aluminio, se puede evidenciar fácilmente que la máxima temperatura se encuentra tanto en los pozos como en la parte baja de la pieza.

La alta temperatura en los pozos no es un inconveniente dado que no forman parte de la pieza, pero la temperatura en la parte inferior de la pieza (circulo verde) muestra que existe una gran posibilidad de que se produzcan problemas de macro porosidades.

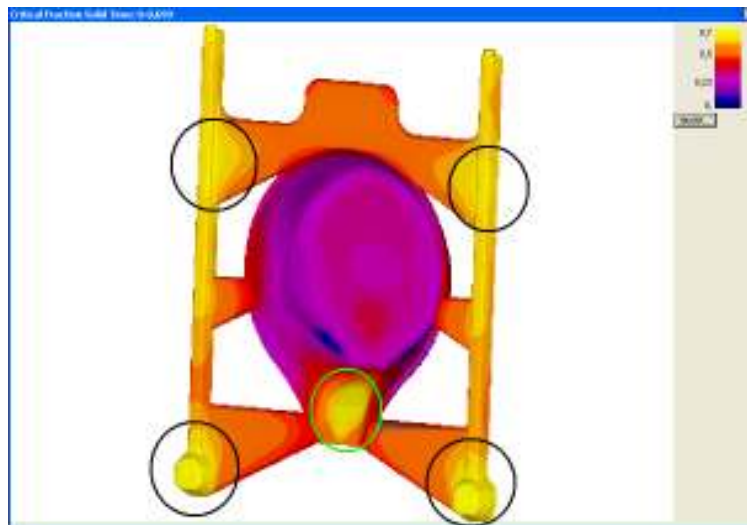
Ilustración 78. Temperaturas al finalizar la solidificación.



CARRIZOSA, 2007

- Para este caso, en la fracción sólida crítica, con la que se muestra la solidificación progresiva del material, se puede ver que tanto en los pozos como la parte central inferior de la pieza encerrada en un circulo verde en la siguiente ilustración, existe una marcada tendencia a generar puntos calientes y por tanto a que se produzcan macro porosidades.

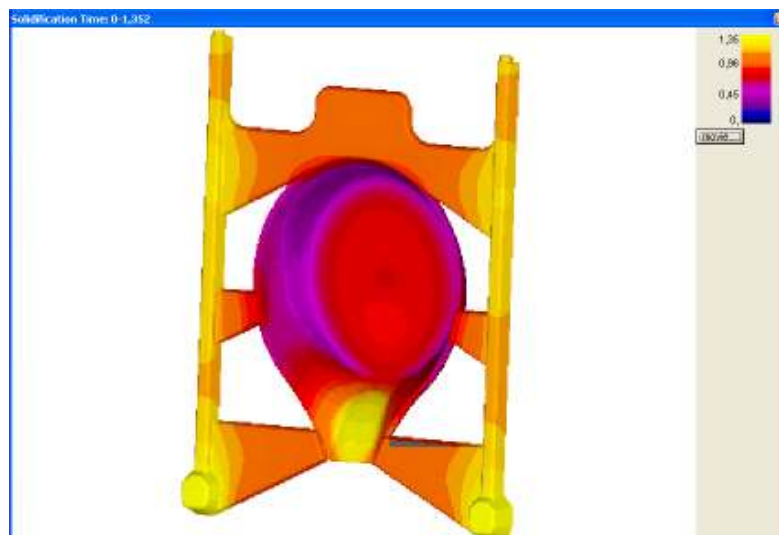
Ilustración 79. Representación de la solidificación progresiva del aluminio.



CARRIZOSA, 2007

- El tiempo de solidificación calculado para la pieza es de un minuto con 21 segundos, 18 segundos menos que el diseño original del canal. En la siguiente ilustración se puede observar en el amarillo más brillante los últimos puntos en lograr solidificarse.

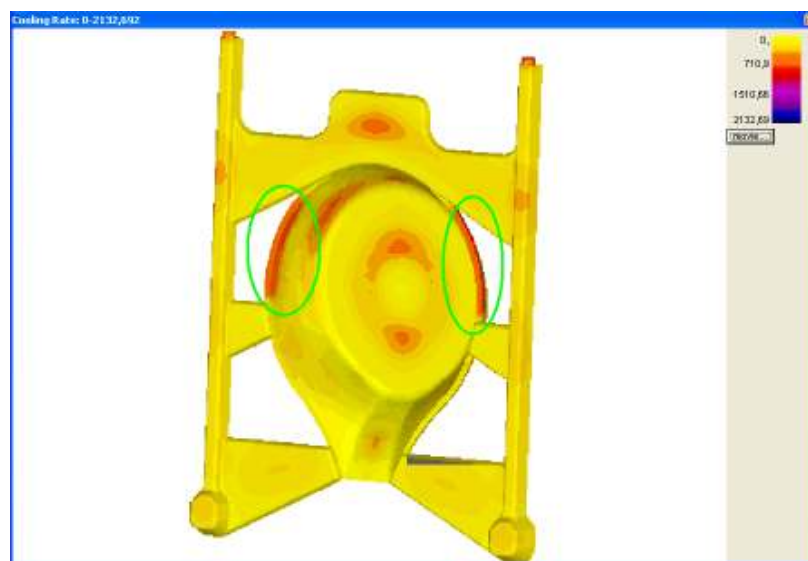
Ilustración 80. Tiempo de solidificación de la alternativa de diseño de canales.



CARRIZOSA, 2007

- El análisis permite ver cómo quedan distribuidas las propiedades del material en la pieza. En la siguiente ilustración, encerrados en óvalos verdes se muestran los bordes de la pieza que se encuentran entre las puertas superiores de entrada de material, en las cuales existe un riesgo moderado de que aparezcan micro porosidades que modifiquen la calidad del artículo terminado.

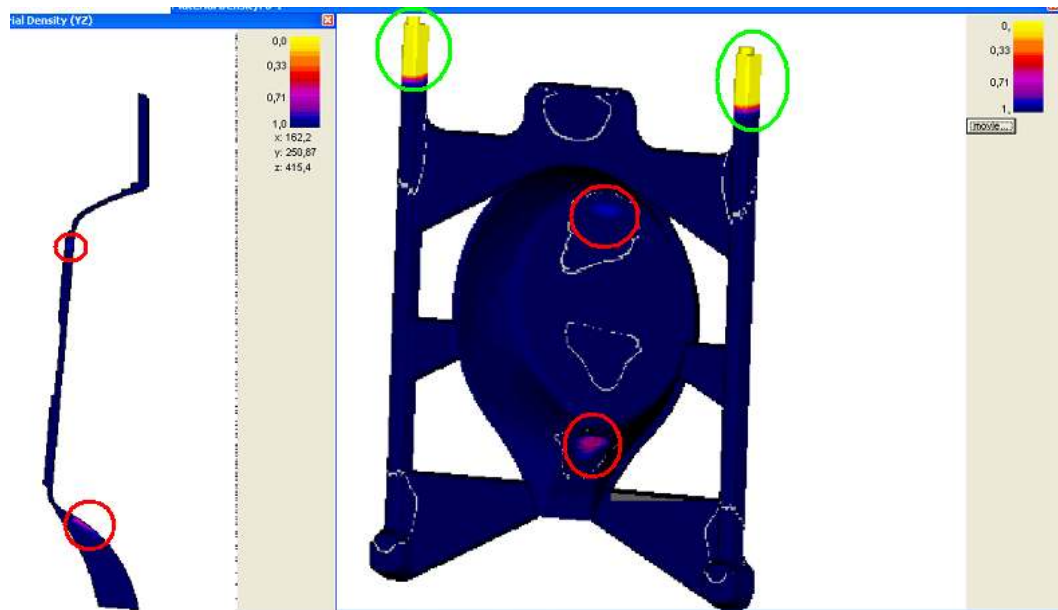
Ilustración 81. Distribución de las propiedades del material para el diseño alternativo.



CARRIZOSA, 2007

- Con la simulación de densidades al finalizar la solidificación se puede evidenciar que los puntos que se encuentran en los círculos rojos dentro de la ilustración, tienen cierta tendencia a presentar micro o macro porosidades, y probablemente las primeras piezas hasta hacer que el molde entre en calor puedan salir con rechupes o agujeros en estos puntos. Las entradas de material que se señalan con círculos verdes muestran un comportamiento normal al generar rechupes en el aluminio cuando se produce la solidificación.

Ilustración 82. Densidades del aluminio al finalizar la solidificación.



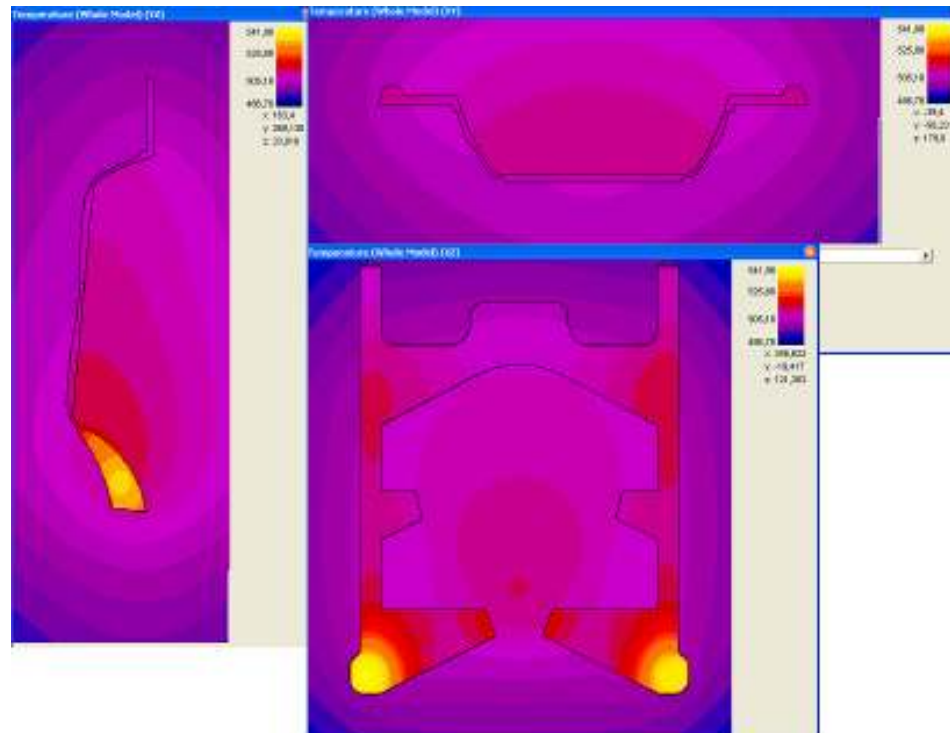
CARRIZOSA, 2007

- Al hacer los cortes en tres planos distintos sobre el molde, se observa la concentración de calor que se presenta en el macho, pero especialmente en la parte baja del molde hacia la parte central de la pieza.

En el otro diseño de canales el calor en el macho se encuentra mejor distribuido, mientras que para este diseño alternativo la temperatura esta focalizada hacia el punto medio bajo, lo cual no es bueno porque aunque se haga reducción de material por la parte posterior del macho, la tendencia a que la temperatura se localice en este sector seguirá siendo predominante.

Una posible causa de este fenómeno puede ser que al haber un área mayor en las puertas de entrada (*gates*) del fondo del molde y unos espacios sin puertas, que los separan de las puertas intermedias, el flujo térmico del aluminio se queda atrapado en gran parte hacia la parte baja del molde.

Ilustración 83. Corte central del molde en xy, xz y yz con comportamiento de la temperatura.



CARRIZOSA, 2007

10.3. CAUSAS DE ERROR EN EL ANALISIS

Para desarrollar el análisis se deben obviar distintos factores y variables que influyen en la consecución de los resultados reales del proceso, debido a que no pueden ser representados ya sea por su alto nivel de complejidad o porque el software de simulación no pueda trabajar con dicha información. A continuación se enumeran algunos factores que pueden influir en los resultados obtenidos en la simulación:

- Para el material del molde se consideró únicamente el acero O1, pero parte de los canales de alimentación, más específicamente por donde se ingresa el aluminio al molde, son de fundición gris.

- Al hacer el llenado en el análisis el molde se encuentra estático en posición vertical, pero en la realidad mientras el molde se va llenando debe ir rotando de la posición en que recibe el aluminio en la coquilla a la posición en que se da la solidificación y apertura, por lo que el comportamiento que se obtiene de la simulación en los momentos iniciales de llenado no es realmente el que ha de presentarse.
- Al ingresar las dimensiones del molde, estas se introducen como un cubo sobre la pieza a llenar, por lo que se omite que el macho del molde posee una reducción de material en la parte posterior que evita que se generen puntos calientes en el molde.
- Al ingresar la geometría de la pieza y hacer el mallado del molde, se omiten las salidas de gases, lo que resulta en presuntos defectos en la pieza, pero que de igual forma sirve para evidenciar la necesidad que se tiene de dichas salidas de gases. Estas salidas de gases se han omitido debido a que su espesor es inferior al tamaño mínimo de 1,2 mm de los elementos del mallado.
- El nivel de refinamiento de malla es un factor crucial a la hora de obtener resultados más precisos en la simulación, por tanto si no se tiene un buen mallado, los resultados no serán confiables.

11. CONCLUSIONES

- Al diseñar una pieza para fundición se deben conocer primero los distintos procesos que se pueden utilizar, ya que dependiendo de factores como el costo, las propiedades mecánicas, el acabado superficial o la cantidad de unidades a producir, determinan el proceso de fundición más favorable para la producción.
- Se ha identificado la información necesaria que se debe tener en cuenta para el desarrollo de un molde de fundición de aluminio por coquilla, enfatizando en el diseño de los canales de alimentación y explicando los demás elementos para lograr piezas de buena calidad.
- Se desarrolla la modelación del molde de fundición, describiendo cada uno de los elementos que lo conforman y su función dentro del sistema. Adicionalmente se hace los respectivos planos que dimensionan tanto el sartén como el molde del mismo.
- Se realiza el análisis del molde con los programas especializados para fundición, evaluando dos alternativas de canales de alimentación. Se evidencia que la primera alternativa presenta mejores condiciones para conformar artículos de buena calidad, mientras que la segunda aunque logre una reducción del peso de los canales de alimentación tiende a presentar macro porosidades en la pieza.
- Se identifica que existen diversas características del proceso que no pueden ser reproducidas en la simulación como la presencia del sistema de expulsión de gases y la reducción de material en la parte posterior del macho, pero que al no estar incluidos dejan ver cuán necesaria es su presencia dentro del diseño del molde.

- Al comparar las dos alternativas de diseño de canales mediante el uso del software se pueden identificar algunas características del proceso que intuitivamente serían muy difíciles de reconocer, especialmente en el comportamiento térmico, ya que para la segunda alternativa, el diseño de los canales favorece la acumulación de temperatura y por tanto la generación de macro porosidades en los pozos y la parte baja de la pieza.
- Al utilizar puertas en continuo contacto con la pieza, utilizadas en la alternativa original de canales, se garantiza una distribución uniforme de la carga térmica, por lo que es menos probable que las piezas resulten con defectos, al igual que las propiedades del material se mantienen constantes para toda la pieza.
- El comportamiento térmico a través del molde es distinto para las dos alternativas de diseño. En la primera la conducción del calor se da más homogéneamente, mientras que para la segunda alternativa se ve la marcada tendencia a acumularse en la parte baja de los canales y la pieza, lo que puede reducir la vida útil del molde y generar defectos en las piezas producidas.

12. RECOMENDACIONES

- Sería interesante instalar un control de temperatura para los moldes mientras se encuentren en producción, para evitar que el exceso de carga térmica genere defectos como agujeros, macro porosidades y micro porosidades en las piezas producidas. Adicionalmente se garantizaría una mayor vida útil para el molde, evitando agrietamientos y deformaciones en el metal.
- Si se diseña un sistema de refrigeración para ubicar en los moldes, se podría incrementar la productividad, ya que se reducirían los tiempos de solidificación y se controlaría la temperatura del molde pudiendo exigirlo aún más.
- Se puede buscar la forma de optimizar el diseño tanto de los canales de alimentación como del sistema de expulsión de gases con ayuda de un software que ofrezca esta posibilidad, teniendo en cuenta que es un proceso que conlleva un alto grado de complejidad y por tanto requiere una alta inversión económica y de tiempo.

13. BIBLIOGRAFÍA

13.1. CLÁSICA

- GERLING, Heinrich. "Moldeo y conformación". España, Editorial Reverté, S.A., 1979. ISBN 84-291-6051-5.
- CAMPBELL, John. "Castings". Londres, Butterworth – Heinemann, 1991. ISBN 0-7506-1696-2.
- HEINE, Richard W. "Principles of metal casting". Estados Unidos, McGraw-Hill, 1967.
- STREET, Robert L. "Elementary Fluid Mechanics". Estados Unidos, John Wiley & Sons, Inc, 1996. ISBN 0-471-01310-2.
- INCROPERA, Frank P. "Fundamentos de transferencia de calor". Mexico, Prentice Hall, 1999. ISBN 970-17-0170-4.
- ÇENGEL, Yunus A. "Termodinamica". Mexico, McGraw Hill, 2003. ISBN 970-10-3966-1.
- ESI GROUP, "Procast user manual". Francia, ESI Group, 2005.
- FINITE SOLUTIONS, "SolidCast training course workbook", Estados Unidos, Finite Solutions incorporated, 2007.
- FINITE SOLUTIONS, "FlowCast training course workbook", Estados Unidos, Finite Solutions incorporated, 2006.

- CARRIZOSA, Pablo. "Manual de diseño para moldes de fundición. Colombia, IMUSA, 2006.
- POLYANIN A. "Hydrodynamics, Mass and Heat Transfer in Chemical Engineering", London, Taylor & Francis, 2002. ISBN 0-415-27237-8.

13.2. INTERNET

- ENCARTA@

Enciclopedia Virtual Encarta. MSN, 2005 <http://es.encarta.msn.com/>

- NADCA@

Asociación norteamericana de fundición por molde permanente, 2006
<http://diecasting.org/default.htm>

- RAMSDEN@

Industria de fundición de aluminio con molde permanente. Visitado en septiembre de 2006. <http://www.ramsden.on.ca/default.htm>

- JSCRIWORLD@

Industria de fundición por diversos procesos, 2001.
<http://www.riword.com1.ru/eng/products/foundry.htm>

- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY@

Departamento norteamericano de energía, 2004.
www.eere.energy.gov/industrial.html

- MAGMA@

Página de software especializado en fundición, 2006.
<http://www.magma-soft.com>

- KEY TO NON FERROUS@

Base de datos sobre metales no ferrosos, 2006. <http://www.key-to-metals.com/Article59.htm>

- IMUSA@

Industria que produce artículos fabricados por moldeo con coquilla, 2005.
<http://www.imusa.com.co/>

- WIKILIBROS@

Colección de libros de texto de contenido libre, 2006.
<http://es.wikibooks.org/wiki/Imagen:Casting.jpg>

- WORSWICK@

Fabricante de maquinaria para fundición, 1996.
http://www.worswick.com/products/gravity_diecasting.html

- INDUSTRIALUSM@

Pagina que describe los distintos procesos de fundición. Visitado en abril de, 2007.
<http://www.geocities.com/usmindustrial/Fundicion.html>

- APRENDIZAJE.COM@

Pagina que describe los distintos procesos de fundición. Visitado en abril de, 2007.
http://www.aprendizaje.com.mx/Curso/Proceso1/Temario1_V.html

- SENATOR TECHNOLOGY@

Fabricante de maquinaria para fundición, 2005.
<http://www.senator-technology.de/>

- MATWEB@

Base de datos de materiales por internet, 2007.

<http://www.matweb.com>

- MMC@

Grupo de modelación matemática y computacional de la universidad autónoma de México. Visitado en julio de 2007.

<http://www.mmc.igeofcu.unam.mx/>